

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DE UN VISCOSÍMETRO
SAYBOLT Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL TEMPERATURA EN
CASCADA PARA EL LABORATORIO DE FLUIDOS DE LA FACULTAD DE
MECÁNICA**

ALEJANDRO PATRICIO MACHUCA CHIGUANO

JOSÉ ANDRÉS YÉPEZ FAJARDO

**TESIS DE GRADO
INGENIERO MECÁNICO**



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

RIOBAMBA – ECUADOR

2009

TABLA DE CONTENIDOS

PÁGINA

CAPÍTULO I.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.1 ANTECEDENTES.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.3 OBJETIVOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.3.1 <i>Objetivo General.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.3.2 <i>Objetivos Específicos.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2 GENERALIDADES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.1 VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.1.1 <i>Definiciones de Viscosidad.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.2 <i>Variación de la viscosidad con la temperatura.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.3 <i>Efecto de la presión sobre la viscosidad.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.4 <i>Ley de Newton de la viscosidad.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.5 <i>Viscosidad dinámica o absoluta (μ).....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.6 <i>Viscosidad cinemática (ν).....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7 <i>Factores que afectan la conducta reológica.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.1 <i>Temperatura.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.2 <i>Rango de corte o gradiente de velocidad.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.3 <i>Tiempo.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.4 <i>Condiciones de medida.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.5 <i>Historia previa.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.7.6 <i>Composición y aditivos.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.8 <i>Fluidos Newtonianos.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.9 <i>FLUIDOS NO NEWTONIANOS.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.9.1 <i>CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.10 <i>Medición de la viscosidad.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.1.11 <i>Viscómetro.</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

2.2	TIPOS DE VISCOSÍMETROS.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.1	VISCOSÍMETRO DE TUBO CAPILAR.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.1.1	Viscosímetro de Ostwald.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.1.2	Viscosímetro de Ubbelohde.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2	VISCOSÍMETROS ROTATORIOS.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2.1	Viscosímetro de Stormer.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2.2	Viscosímetro de cono -placa.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2.3	Viscosímetro de Cilindros Concéntricos o de Coutte.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.2.4	Viscosímetro Brookfield.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.3	VISCOSÍMETROS EMPÍRICOS.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.3.1	Viscosímetro Saybolt.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.3.2	Viscosímetro Redwood.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.3.3	Viscosímetro Engler.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.4	VISCOSÍMETRO DE HOPPLER.	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.4.1	Viscosímetro de Caída de Bola.	¡Error! Marcador no definido.
2.3	ACEITES LUBRICANTES.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.1	Funciones de los lubricantes.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.2	Clasificación de los lubricantes.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3	Propiedades físicas de los lubricantes.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.1	Viscosidad.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.2	Punto de inflamación.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.3	Punto de fuego o ignición.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.4	Punto de fluidez.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.5	Residuos de carbón.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.6	Color.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.7	Índice de viscosidad (IV).	¡Error! Marcador no definido.
2.3.3.8	Gravedad API (Instituto Americano del Petróleo).	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4	Características de un lubricante.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4.1	Grado de viscosidad SAE (Society of Automobile Engineers).	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4.2	Clasificación API para aceites de motor.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.4.3	Grado de viscosidad ISO para aceites lubricantes.	¡Error! Marcador no definido.
2.3.5	SINTEMP 2000.	¡Error! Marcador no definido.

2.3.6	Cálculo del efecto de la temperatura sobre los aceites lubricantes.	¡Error! Marcador no definido.
2.4	SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO MÁS ADECUADO PARA ACEITES DERIVADOS DEL PETRÓLEO...	¡Error! Marcador no definido.
MARCADOR NO DEFINIDO.		
2.5	TRANSFERENCIA DE CALOR	¡Error! Marcador no definido.
2.5.1	ELEMENTOS DE CALORIMETRÍA.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.1.1	Calor específico (C_p) o capacidad calorífica.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.1.2	Conductividad térmica (k).	¡Error! Marcador no definido.
2.5.2	TRANSMISIÓN DEL CALOR POR CONDUCCIÓN.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.2.1	Conducción de calor en paredes cilíndricas.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.2.2	Analogía Termo-eléctrica.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3	TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.1	Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.2	Números adimensionales.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.2.1	Número de Reynolds.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.2.2	Número de Nusselt (o Número de Biot: B).	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.2.3	Número Prandtl.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.2.4	Número de Grashof.	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.3	Convección Forzada.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.3.1	Régimen laminar.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.3.2	Régimen turbulento.....	¡Error! Marcador no definido.
2.5.3.4	Convección natural.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO III.....		¡Error! Marcador no definido.
3	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL	¡Error! Marcador no definido.
3.1	COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2	SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO.	¡Error! Marcador no definido.
3.3	SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO.	¡Error! Marcador no definido.
3.3.1	Elementos básicos de un sistema de lazo cerrado.	¡Error! Marcador no definido.
3.4	SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA.	¡Error! Marcador no definido.
3.5	CONTROL DE TEMPERATURA EN CASCADA.	¡Error! Marcador no definido.
3.5.1	Ventajas del control en cascada.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2	MODELOS MATEMÁTICOS.....	¡Error! Marcador no definido.

3.5.2.1	Sistemas térmicos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.5.2.2	OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO IV		¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1	ALTERNATIVAS DEL DISEÑO DEL VISCOSÍMETRO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.1.1	Selección del material de construcción de los recipientes.	¡Error! Marcador no definido.
4.1.2	Selección del material de construcción del viscosímetro.....	¡Error! Marcador no definido.
4.1.3	SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2	NORMAS DE DIMENSIONAMIENTO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.2.1	Método Estándar de Prueba para Viscosidad Saybolt Universal....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.2	Definiciones.	¡Error! Marcador no definido.
4.2.3	Resumen del método de prueba.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.4	Preparación del equipo.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2.5	Procedimiento.	¡Error! Marcador no definido.
4.2.6	Tipo de fluido recomendado para el baño maría.	¡Error! Marcador no definido.
4.3	DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.3.1	Análisis térmico del fuel oil (aceite) respecto al fluido caliente (baño maría).....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2	Análisis del aceite.	¡Error! Marcador no definido.
4.3.3	Análisis del flujo de agua caliente.	¡Error! Marcador no definido.
4.3.4	ANALISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION.	¡Error! Marcador no definido.
4.3.5	Cálculo de las resistencias térmicas.	¡Error! Marcador no definido.
4.3.6	Cálculo de la potencia que consumen las resistencias eléctricas.	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO V		¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5	PRUEBAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.1	VALORES EXPERIMENTALES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.2	COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES DE VISCOSIDAD CON LOS APORTADOS POR LOS FABRICANTES, PARA EVALUAR EL ERROR PORCENTUAL.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.3	ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

CAPÍTULO VI ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

6 COSTOS..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

6.1 COSTOS DIRECTOS. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

6.1.1 *Materiales.* **¡Error! Marcador no definido.**

6.1.2 *Operaciones tecnológicas/Equipos.* **¡Error! Marcador no definido.**

6.1.3 *Transporte.* **¡Error! Marcador no definido.**

6.2 COSTOS INDIRECTOS..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

6.2.1 *Costos ingenieriles.* **¡Error! Marcador no definido.**

6.2.2 *Costos por imprevistos.* **¡Error! Marcador no definido.**

6.2.3 *Costos por utilidad.*..... **¡Error! Marcador no definido.**

6.3 COSTOS TOTALES DEL EQUIPO. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

CAPÍTULO VII ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

7.1 CONCLUSIONES. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

7.2 RECOMENDACIONES. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....148

ANEXOS.....150

LISTA DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla I. Unidades de viscosidad dinámica.....	9
Tabla II. Unidades de viscosidad cinemática.....	10
Tabla III. Ecuaciones empíricas para fluidos newtonianos.....	15
Tabla IV. Constantes A y B.....	33
Tabla V. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.....	44
Tabla VI. Grado de viscosidad API para motores a gasolina.....	47
Tabla VII. Grado de viscosidad API para motores a diesel.....	48
Tabla VIII. Grado de viscosidad ISO.....	49
Tabla IX. Características del lubricante SYNTEMP 2000.....	50
Tabla X. Analogía Termo-eléctrica.....	60
Tabla XI. Datos técnicos de los controladores.....	74
Tabla XII. Elementos básicos térmicos.....	84
Tabla XIII. Valores instantáneos de Temperatura en función del aceite grado SAE 15W40.....	85
Tabla XIV. Valores instantáneos de Temperatura en función del aceite grado SAE 10W30.....	87
Tabla XV. Baño maría recomendado.....	99
Tabla XVI. Parámetros del Grado SAE 40.....	129
Tabla XVII. Parámetros del Grado SAE 15W40.....	130
Tabla XVIII. Parámetros del Grado SAE 10W30.....	131

Tabla XIX. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 40 desde 40 a 45°C.....	131
Tabla XX. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 40 desde 71 a 74°C.....	132
Tabla XXI. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 15W40 desde 40 a 43°C.....	132
Tabla XXII. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 15W40 desde 70 a 74°C.....	133
Tabla XXIII. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 10W30 desde 44 a 46°C....	133
Tabla XXIV. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 10W30 desde 71 a 72°C....	133
Tabla XXV. Costos por materiales empleados.....	140
Tabla XXVI. Costos por operaciones tecnológicas.....	143
Tabla XXVII. Costos por transporte y otros.....	143
Tabla XXVIII. Costos totales directos del equipo.....	143
Tabla XXIX. Costos por ingeniería.....	144
Tabla XXX. Costos por imprevistos.....	144
Tabla XXXI. Costos por utilidades.....	145
Tabla XXXII. Total de costos indirectos.....	145
Tabla XXXIII. Costo total del Viscosímetro Saybolt Universal.....	145

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los líquidos.....	5
Figura 2. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los gases.....	6
Figura 3. Variación de la viscosidad dinámica con la temperatura, del aire y del agua...6	6
Figura 4. Planos paralelos de un fluido.....	7
Figura 5. Curvas características de un fluido newtoniano.....	14
Figura 6. Viscosímetro de tubo capilar.....	18
Figura 7. Viscosímetro de Ostwald.....	19
Figura 8. Viscosímetro Ubbelohde.....	22
Figura 9. Viscosímetros Rotacionales.....	23
Figura 10. Viscosímetro de Stormer.....	24
Figura 11. Viscosímetro de cono y placa.....	26
Figura 12. Viscosímetro de cilindros concéntricos.....	28
Figura 13. Variación de la velocidad.....	29
Figura 14. Viscosímetro Saybolt con los dos tipos de orificios.....	32
Figura 15. Esquema de un Viscosímetro Engler.....	35
Figura 16. Viscosímetro Engler.....	35
Figura 17. Viscosímetro de Caída de Bola.....	37
Figura 18. Viscosidad dinámica de diferentes aceites SAE a diferentes temperaturas...45	45
Figura 19. Viscosidad dinámica de un aceite multigrado SAE 15W40.....	46
Figura 20. Transmisión de calor por conducción en la pared del viscosímetro.....	57

Figura 21. Cilindro.....	59
Figura 22. Resistencias en serie de un tubo cilíndrico aislado.....	61
Figura 23. Fluido a diferentes temperaturas.....	65
Figura 24. Diagrama de bloques.....	72
Figura 25. Sensor NTC.....	72
Figura 26. Controlador digital MT – 543Ri plus.....	73
Figura 27. Esquema de conexión.....	74
Figura 28. Sistema de control en lazo abierto.....	75
Figura 29. Diagrama de control en lazo cerrado.....	76
Figura 30. Elementos básicos de un sistema de control en lazo cerrado.....	76
Figura 31. Sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt.....	80
Figura 32. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt Universal.....	81
Figura 33. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 15W40).....	86
Figura 34. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 10W30).....	89
Figura 35. Frasco donde se recibe la muestra de aceite (dimensiones en mm).....	96
Figura 36. Dimensiones (en mm) del Viscosímetro Saybolt Universal.....	97
Figura 37. Transferencia de calor entre el aceite y el baño maría.....	100
Figura 38. Esquema general del Viscosímetro Saybolt.....	102
Figura 39. Medidas del Viscosímetro Saybolt (milímetros).....	102
Figura 40. Entrada y salida del flujo de agua caliente.....	106
Figura 41. Diámetros externos del viscosímetro que son bañadas por el flujo de agua.....	109
Figura 42. Medidas del recipiente del baño maría (unidades en mm).....	110
Figura 43. Resistencias que intervienen en el sistema.....	119
Figura 44. Resistencias térmicas.....	120
Figura 45. Diámetros de los distintos materiales que intervienen.....	120
Figura 46. Resistencias eléctricas de inmersión.....	126
Figura 47. Viscosidad vs Temperatura del aceite grado SAE 40.....	135

Figura 48. Viscosidad vs Temperatura de un aceite grado SAE 15W40.....136

Figura 49. Viscosidad vs Temperatura de un aceite Grado SAE 10W30.....137

RESUMEN.

Se ha construido un Viscosímetro Saybolt Universal al cual se le ha implementado un Sistema de Control de Temperatura en Cascada para el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Mecánica, el fin es tener una herramienta para medir las viscosidades de los aceites livianos derivados del petróleo.

Para la construcción, tanto del viscosímetro como su punta (orificio de escurrimiento) y su copa Saybolt Universal están basados bajo la Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D88-81; además de las dimensiones como del material para su construcción, la Norma ASTM recomienda un procedimiento que se debe seguir para realizar las pruebas, además el tipo de fluido que se debe utilizar en el baño maría. El equipo permite evaluar numéricamente la viscosidad absoluta de un aceite, además con la implementación del Sistema de Control en Cascada puede mantener constante la temperatura a la cual se desee evaluar la viscosidad. El Sistema de Control en Cascada permite el control de la temperatura tanto del aceite como del baño maría, para esta técnica los controladores están conectados en serie.

Con la implementación de este proyecto el usuario podrá medir la viscosidad absoluta de un aceite y comparar dichos resultados con los proporcionados por los distribuidores, información que es importante para prolongar la vida útil de un motor. Según las pruebas experimentales se obtiene un error porcentual medido que oscila entre 0.28 y el 10%, que es un error aceptable dentro de los parámetros establecidos por los distribuidores.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1 ANTECEDENTES.

La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio de diámetro pequeño es una indicación de su viscosidad. El aceite para un motor por lo general, es bastante difícil de vaciar cuando está frío lo cual indica que tiene una viscosidad alta. Conforme la temperatura del aceite va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente. Para cuantificar ésta propiedad tan importante como lo es la viscosidad, necesitamos de un equipo llamado Viscosímetro Saybolt, al cual implementaremos un Control de Temperatura en Cascada, para mejorar la estabilidad de la temperatura ya que la viscosidad depende únicamente de ésta variable.

El objetivo del control en cascada es mejorar la estabilidad de una variable del proceso aun con una optima sintonización del controlador en lazo retroalimentado.

El sistema de Control en Cascada se establece cuando la variable manipulada (flujo de agua caliente) sufre importantes perturbaciones que afectan en exceso a la variable controlada (temperatura del aceite derivado del petróleo a la cual se desea evaluar su viscosidad).

1.2 JUSTIFICACIÓN.

En la mecánica de fluidos es de vital importancia el conocimiento de las propiedades de los fluidos a estudiar ya que de ellos depende de manera directa la obtención de datos imprescindibles para el cálculo en un problema como lo es la viscosidad de un aceite. Ésta es una de las razones por la cual es necesario conocer de donde se obtienen estos datos de gran valor para el estudio de los fluidos ya que fueron obtenidos por experimentación.

En la industria es muy importante obtener datos exactos de la viscosidad por lo que se hace necesario que el Viscosímetro Saybolt sea muy preciso, para lo cual se implementa un Sistema de Control en Cascada al Viscosímetro Saybolt lo cual permite optimizar dicho Viscosímetro ya que aplicando el Control en Cascada se puede mantener la temperatura constante del líquido (aceite derivado de Petróleo) del cual se va a determinar su viscosidad.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo general.

- Diseñar, construir y experimentar un Viscosímetro Saybolt implementando un sistema de control de temperatura en cascada.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Analizar los diferentes tipos de Viscosímetros para aceite derivado del petróleo.
- Estudiar las ventajas de un sistema de control de temperatura en cascada.
- Dimensionar el equipo y elaborar los diagramas de instrumentos del sistema.

- Determinar experimentalmente las curvas de variación de la viscosidad en función de la temperatura.
- Elaborar un manual de operación y guía de práctica de laboratorio.

CAPÍTULO II

2 GENERALIDADES.

En los procesos industriales es importante conocer las propiedades físico químicas de las sustancias con las que se trabajan y en especial la viscosidad de los fluidos. La Mecánica de los fluidos, como área de estudio, se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos, a la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada.

Las mediciones de viscosidad son importantes en la industria para apoyar los cálculos de flujo de líquidos, en la determinación de coeficientes de transferencia de calor y en el control de los procesos químicos. La viscosidad se utiliza como un indicador cuantitativo de calidad en la industria de los aceites, la petroquímica, de los alimentos, la farmacéutica, la textil, de las pinturas, entre otras. A nivel industrial, existe un número indefinido de equipos, con diferentes diseños, que se utilizan para medir viscosidad. Por lo tanto, los resultados que se obtienen varían dependiendo de las unidades en que se reporta la viscosidad.

2.1 VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS.

2.1.1 Definiciones de viscosidad.

- La viscosidad es una propiedad físico-química de los fluidos y representa la resistencia que presentan los fluidos al fluir. Los fluidos reales muestran una amplia diversificación de resistencia a los esfuerzos cortantes.¹
- La viscosidad es una de las propiedades más importante de un lubricante. De hecho buena parte de los sistemas de clasificación de los aceites están basados en ésta propiedad por lo tanto la viscosidad es una especificación de primer orden en los aceites lubricantes, ya que condiciona las cualidades requeridas para la lubricación.²
- La viscosidad es una de las principales características de los combustibles líquidos que determina el método de las operaciones de llenado y vaciado, las condiciones de transporte y bombeo, la resistencia hidráulica durante el transporte por tuberías y el trabajo efectivo de los quemadores.³

2.1.2 Variación de la viscosidad con la temperatura.⁴

El aceite para un motor, por lo general es bastante difícil de vaciar cuando está frío, lo cual indica que tiene una viscosidad alta. Conforme la temperatura del aceite va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente, como se ilustra en la figura 1. Todos los **líquidos** exhiben este comportamiento en algún grado.

¹ HANNIBAL BRITO: TEXTO BÁSICO DE FENÓMENO DE TRANSPORTE I, 18

² AVALLONE EUGENE & BAUMEISTER THEODORE: MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO, 3-40.

³ ZABALA GILBERTO: APUNTES DE COMBUSTIÓN PAG 19

⁴ <http://ich1102-2sem2007-g5.blogspot.com/>

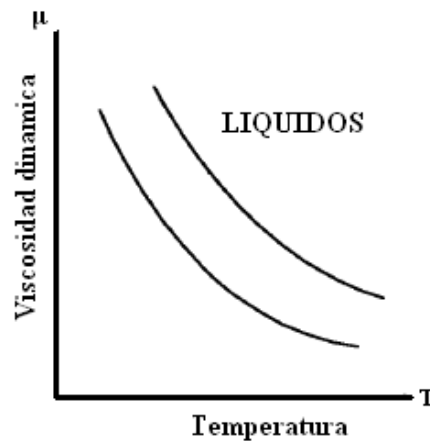


Figura 1. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad.

En el Anexo A, se presentan gráficas de la viscosidad dinámica en función de la temperatura para muchos líquidos comunes.

En los **gases** se comportan de manera diferente a los líquidos, en el hecho de que la viscosidad aumenta al tiempo que aumenta la temperatura, como se observa en la figura 2.

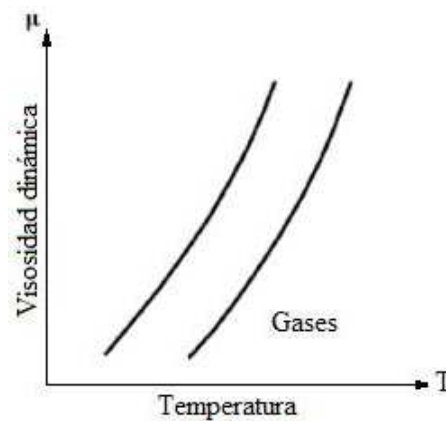


Figura 2. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los gases.

En la figura 3, se tiene la curva del agua y del aire, la cual varía su viscosidad dinámica dependiendo de la temperatura.

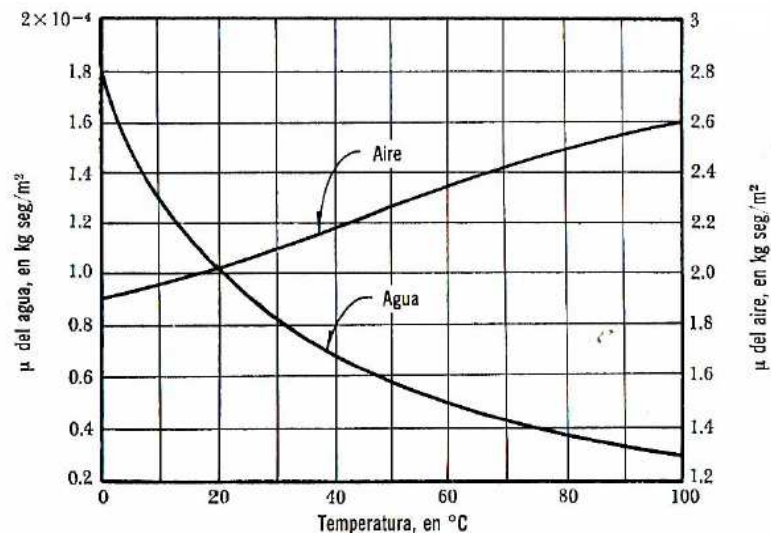


Figura 3. Variación de la viscosidad dinámica con la temperatura, del aire y del agua.

2.1.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.⁵

- **Líquidos:** La viscosidad de la mayor parte de los líquidos no se ve afectada por presiones moderadas, pero a presiones altas se ha encontrado que la viscosidad crece sensiblemente. Tal es el caso, por ejemplo, de la viscosidad del agua a 10 000 atm, que es el doble del valor correspondiente a 1 atm.
- **Gases:** La viscosidad de los gases es esencialmente independiente de la presión cuando está toma valores entre unos cuantos centésimos de una atmósfera y unas cuantas atmósferas.

2.1.4 Ley de Newton de la viscosidad.

⁵ FOX RONALD & DONALD ALAN: INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS, APÉNDICE A, 688-689.

Isaac Newton definió a la viscosidad considerando el modelo representado en la figura 4. Dos placas paralelas separadas por una distancia “y”, y con el espacio entre ellas lleno de fluido, una de ellas fija y la otra móvil. La placa fija sin movimiento se encuentra en contacto con el fluido, por lo tanto tienen una velocidad igual, en cambio la placa superior se mueve a una velocidad constante “V” al actuar sobre ella una fuerza “F” también constante.

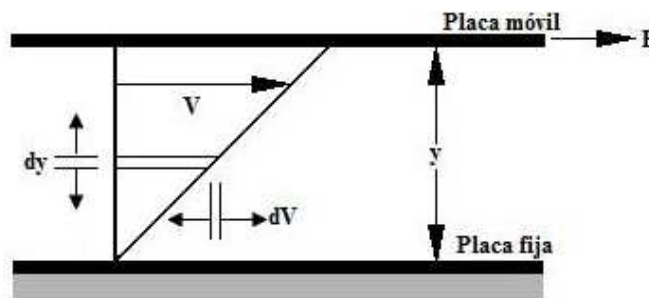


Figura 4. Planos paralelos de un fluido.

Newton asumió que la fuerza requerida para mantener esta diferencia en velocidad era proporcional a la diferencia en velocidad a través del líquido, o el “gradiente de velocidad”. Para expresar esto, Newton escribió:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy} \quad (2.1)$$

$$\frac{dV}{y} = \lambda \quad (2.2)$$

Se reemplaza la ecuación 2.2 en la ecuación 2.1, se obtiene la denominada ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu * \gamma \quad (2.3)$$

Donde:

τ : Tensión o esfuerzo cortante, [Pa]

- μ : Viscosidad dinámica o absoluta, [Pa*s]
 γ : Deformación del fluido o gradiente de velocidad, [s⁻¹]

2.1.5 Viscosidad dinámica o absoluta (μ).⁶

La viscosidad dinámica suele denotarse a través de la letra griega μ . En la ley de Newton enunciada anteriormente (ecuación 2.3), μ es la viscosidad absoluta o coeficiente de viscosidad dinámica, despejando este valor de dicha ecuación se tiene:

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.4)$$

La viscosidad absoluta es una propiedad de los fluidos que indica la mayor o menor resistencia que éstos ofrecen al movimiento de sus partículas cuando son sometidos a un esfuerzo cortante. Algunas unidades a través de las cuales se expresa ésta propiedad se observa en la Tabla I. Es importante resaltar que ésta propiedad depende de manera muy importante de la temperatura, disminuyendo al aumentar la misma.

Tabla I. Unidades de viscosidad dinámica.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad dinámica
Sistema Internacional (SI)	N*s/m, Pa*s, o Kg/(m*s)
Sistema Británico de unidades	(lb*s)/pie ² o slug/(pie*s)
Sistema c.g.s.	poise=dina*s/cm ² = g/(cm*s)=0.1 Pa*s Centipoise = poise /100

⁶ HANNIBAL BRITO: TEXTO BÁSICO DE FENÓMENO DE TRANSPORTE I, 28 - 29

Uno de los equipos diseñados para determinar ésta propiedad es el Viscosímetro Stormer que se lo describe más adelante. En el Anexos B, Tabla B-1 se presentan algunas equivalencias de unidades (factores de conversión) de este tipo de viscosidad.

2.1.6 Viscosidad cinemática (ν).⁷

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, ésta suele denotarse como ν .

$$\nu = \frac{\text{viscosidad dinámica}}{\text{densidad del fluido}} = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

En la Tabla I se presentan las unidades de viscosidad cinemática en los tres sistemas utilizados con frecuencia.

Tabla II. Unidades de viscosidad cinemática.

Sistema de unidades	Unidades de viscosidad cinemática
Sistema Internacional (SI)	m ² /s
Sistema Británico de unidades	pie ² /s
Sistema c.g.s.	stoke = cm ² /s = 1 X 10 ⁻⁴ m ² /s Centistoke = stoke /100 = 1 X 10 ⁻⁶ m ² /s

Para evaluar numéricamente la viscosidad de un aceite, cualquiera de las muchas pruebas estándar puede ser utilizada. Aunque estas pruebas difieren una de otras en mayor o menor grado, utilizan básicamente el mismo principio. Todas ellas miden el tiempo requerido para que una cantidad específica de aceite, a una temperatura dada, fluya por acción de la

⁷ AVALLONE EUGENE & BAUMEISTER THEODORE: MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO, 3-40.

gravidad a través de un orificio normalizado. Entre más espeso sea el aceite, mayor será el tiempo para que pase.

Es importante tener un control estricto de la temperatura. La viscosidad de cualquier aceite aumenta cuando es enfriado y disminuye cuando es calentado. Por esta misma razón, el valor de la viscosidad de un aceite debe ir siempre acompañado por la temperatura a la cual fue determinado.

En Anexos B, Tabla B-2 se presentan algunas equivalencias de unidades (factores de conversión) de este tipo de viscosidad. Usualmente en refinería se utiliza varias unidades para referirse a la viscosidad cinemática. Además de centistokes existen las escalas (SSU) segundos Saybolt Universal, (SSF) segundos Saybolt Furol que se utiliza en USA, (RI) Segundos Redwood que se utiliza en Inglaterra y (°E) grados Engler que se utiliza en Europa.

2.1.7 Factores que afectan la conducta reológica.⁸

Los datos de la viscosidad a menudo funcionan como una “ventana” a través de la cual otras características de un material pueden ser observadas. La viscosidad es más fácilmente medible que alguna de las propiedades que la afectan, haciéndola una herramienta valuable para la caracterización del material. Se puede entonces mencionar:

2.1.7.1 Temperatura.

⁸ URRUTIA URRUTIA FERNANDO & VELOZ HARO NEIL: TESIS DE GRADO, 8-12.

Uno de los factores más obvios que puede tener efecto en la conducta reológica de un material es la temperatura. Algunos materiales son bastantes sensitivos a la temperatura, y relativamente una pequeña variación dará como resultado un cambio significativo en la viscosidad.

La consideración del efecto de la temperatura en la viscosidad es esencial en la evaluación de materiales que serán sometidos a variación de temperatura para su uso o procesamiento, tales como aceites de motor, grasas y lubricantes.

2.1.7.2 Rango de corte o gradiente de velocidad.

Los fluidos no newtonianos tienden a ser la regla más que la excepción en el mundo real, haciendo una apreciación de los efectos del gradiente de velocidad como una necesidad que compromete la aplicación práctica de los datos reológicos.

Sería desastroso, por ejemplo, tratar de bombear un fluido dilatante a través de un sistema en el que solo debe ir sólido dentro de la bomba, llevando al proceso a una brusca parada. Mientras éste es un ejemplo extremo, la importancia de los rangos de corte o gradiente de velocidad no deben ser desestimados.

Cuando un material es sometido a una variedad de rangos de corte en el procesamiento o en el uso, es esencial saber su viscosidad a los rangos de corte proyectados.

Como ejemplos de materiales que son sometidos y afectados por variaciones amplias en el rango de corte durante el proceso y uso son: pinturas, cosméticos, revestimientos y la sangre en el sistema circulatorio humano.

2.1.7.3 Tiempo.

El tiempo transcurrido bajo condiciones de corte obviamente afecta a algunos tipos de materiales que son dependientes del tiempo. Pero pueden ocurrir cambios en la viscosidad sobre el tiempo aunque el material no esté siendo cortado.

2.1.7.4 Condiciones de medida.

Las condiciones de medida de un material durante la medida de su viscosidad puede tener un efecto en los resultados de tal medida. Es por lo tanto importante conocer y controlar como sea posible, el medio ambiente de alguna muestra que se vaya a ensayar.

- PRIMERO: Las técnicas de la medida de la viscosidad deben estar adheridas a variables tales como: el modelo del aparato que va a efectuar tal medición (viscosímetro). Tamaño del recipiente de la muestra, técnica de preparación de la muestra. Todas éstas, afectan no solo en la precisión de las medidas, sino la viscosidad actual del material que se está midiendo.
- SEGUNDO: Otros factores menos obvios que pueden afectar la viscosidad deben ser considerados. Por ejemplo el material de muestra puede ser sensitivo a la atmósfera ambiental, como es el caso de los materiales de impresión dental, el alto horno, la sangre, otros. Entonces se puede expresar que una atmósfera controlada favorable a los objetivos del ensayo, debe ser proveída.

Otro factor que puede afectar la medida de la viscosidad es la homogeneidad de la muestra. Usualmente es deseable tener una muestra homogénea de modo que los resultados obtenidos sean más resistentes.

2.1.7.5 Historia previa.

Que le ha sucedido a una muestra anterior a una medida de la viscosidad que pudiera afectar el resultado, especialmente en fluidos sensitivos al calor o al envejecimiento. Así las condiciones de almacenaje y las técnicas de preparación de la muestra deben ser diseñadas para minimizar los efectos posibles en los ensayos subsecuentes de viscosidad. Los materiales tixotrópicos, en particular son sensitivos a la historia anterior o previa, dado que su viscosidad será afectada por el agitación, mezclado, vaciamiento, o alguna otra actividad que produzca el corte en la muestra.

2.1.7.6 Composición y aditivos.

La composición de un material es determinante en su viscosidad. Cuando esta composición es alterada, sino por el cambio en las proporciones de las substancias del componente, o por la adición de otros materiales, un cambio en la viscosidad es bastante aparente. Por ejemplo, la adición de solvente a la tinta de imprenta reduce la viscosidad de la tinta; y además muchos aditivos son utilizados para controlar las propiedades reológicas de pinturas.

2.1.8 Fluidos Newtonianos.⁹

Los fluidos newtonianos son aquellos cuya viscosidad es constante, o dicho de otra forma, son aquellos cuyo esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad. Un fluido newtoniano se representa en la figura 5. En la figura 5A se demuestra la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y el gradiente de velocidad (γ) es una línea recta. La figura 5B demuestra que la viscosidad dinámica del fluido permanece constante mientras que

⁹ http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-155028//06Mtbp06de29.pdf

el gradiente de velocidad ($\gamma = dV/dy$) varía. Los fluidos newtonianos siguen la ley de Newton, (ecuación 2.3) en la que la viscosidad sólo depende de la temperatura siendo independientes del tiempo.

Ejemplos de fluidos newtonianos { Agua, gasolina, la mayoría de las soluciones de sal en agua, kerosene, la mayoría de los aceites de motor, etc.

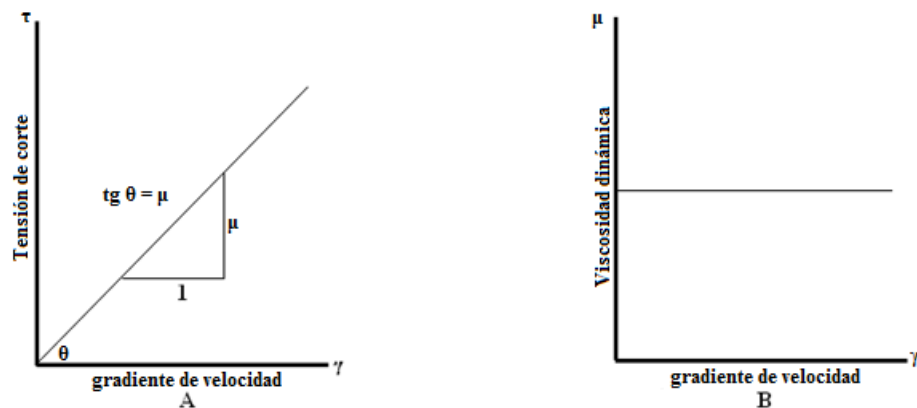


Figura 5. Curvas características de un fluido newtoniano.

2.1.9 FLUIDOS NO NEWTONIANOS.¹⁰

Son aquellos fluidos que no cumplen la ley de Newton de la viscosidad, por lo tanto, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación deja de ser lineal.

¹⁰ SHAMES IRVING: MECÁNICA DE FLUIDOS, 15-16

Un gran número de ecuaciones empíricas se han propuestos para modelar las relaciones observadas entre τ y dV/dy (γ) para fluidos no newtonianos. Pueden representarse de manera adecuada para muchas aplicaciones de ingeniería mediante un modelo (ecuaciones empíricas); a continuación en la Tabla III se detallan estos modelos.

Tabla III. Ecuaciones empíricas para fluidos no newtonianos.

Modelo	Ecuación	Parámetros
Bingham	$\tau = \tau_0 + (\mu_p * \gamma)$	τ_0, μ_p
Ostwald - Waele	$\tau = k * (\gamma)^n$	n, k
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + K * \gamma^n$	τ_0, K

2.1.9.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS.¹¹

Los fluidos no newtonianos se pueden clasificar en tres grandes grupos, aunque se debe aclarar que los límites de la clasificación no son muy claros:

- Independientes del tiempo
 - Sin esfuerzo cortante inicial
 - Pseudoplásticos
 - Dilatantes
 - Con esfuerzo cortante inicial
 - Fluidos de Bingham
 - Herschel-Bulkley
 - Tixotrópicos
- Dependientes del tiempo
 - Reopéticos
- Viscoelásticos.

¹¹ MOTT ROBERT: MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA, 27

2.1.10 Medición de la viscosidad.¹²

Los procedimientos y el equipo para medir la viscosidad son numerosos. Algunos emplean los principios fundamentales de la mecánica de fluidos, para tener la viscosidad en sus unidades básicas. Otros indican exclusivamente valores relativos de la viscosidad que se pueden utilizar para comparar diferentes fluidos.

2.1.11 Viscómetro.¹³

Un viscosímetro (denominado también viscosómetro) es un instrumento para medir la viscosidad y algunos otros parámetros de un fluido. Fue Isaac Newton el primero en sugerir una fórmula (ecuación 2.3) para medir la viscosidad de los fluidos. En 1884 Poiseuille mejoró la técnica estudiando el movimiento de líquidos en tuberías.

2.2 TIPOS DE VISCOSÍMETROS.

Los Tipos de viscosímetros más comunes se detallan en el siguiente cuadro:

- | | | | |
|---|------------------------------|---|---|
| • | Viscosímetro de Tubo Capilar | { | <ul style="list-style-type: none"> - Viscosímetro de Ostwald - Viscosímetro Ubbelohde - Viscosímetro de Cannon-Fenske |
| • | Viscosímetro Rotacionales | { | <ul style="list-style-type: none"> - Viscosímetro de Stormer (Searle) - Viscosímetro de Cono-Placa - Viscosímetro de Cilindro Concéntrico - Viscosímetro Brookfield |

¹² MOTT ROBERT: MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA, 29.

¹³ <http://es.wikipedia.org/wiki/Viscos%C3%ADmetro>

- Viscosímetro de Tambor Giratorio
- Viscosímetros Empíricos
 - Viscosímetro Saybolt
 - Universal
 - Furol
 - Viscosímetro Engler
 - Viscosímetro Redwood
- Viscosímetro de Hoppler
 - Viscosímetro de Caída de Bola

2.2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.

2.2.1.1 Viscosímetro de Tubo Capilar.¹⁴

Probablemente el primer experimento científico en el que se utilizó un capilar o tubo para medir el flujo fue realizado en 1839 por Hagen, seguido de cerca por el trabajo de Poiseuille. Poiseuille estudió problemas de flujo capilar para entender mejor la circulación de la sangre a través de los vasos capilares en el cuerpo humano. Descubrió la relación (conocida como la ley de Hagen-Poiseuille) entre la velocidad de flujo y la caída de presión para un flujo capilar.

¹⁴ MOTT ROBERT: MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA, 31 - 32.

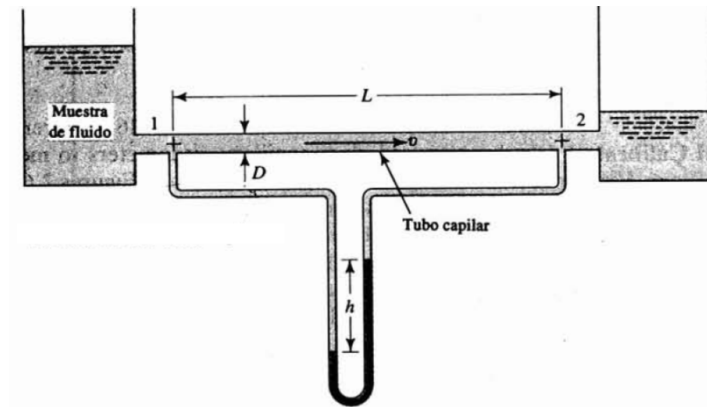


Figura 6. Viscosímetro de Tubo Capilar.

En la figura 6, se muestran dos recipientes conectados por un tubo largo de diámetro pequeño, conocido como **tubo capilar**. Conforme el fluido fluye a través del tubo con una velocidad constante, el sistema pierde algo de energía, ocasionando una caída de presión que puede ser medida utilizando un manómetro. La magnitud de la caída de presión está relacionada con la viscosidad del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta p = \frac{32 * \mu * v * L}{D^2} \quad (2.6)$$

Donde:

Δp : Pérdida de presión entre los puntos 1 y 2, $\left[\frac{Kg}{m^2} \right]$

μ : Viscosidad dinámica, $[Pa * s]$

L : Longitud del tubo entre los puntos 1 y 2, $[m]$

v : Velocidad del fluido, $\left[\frac{m}{s} \right]$

D : Diámetro interior del tubo, $[m]$

Los tipos de viscosímetros capilares más comunes, y sus modos de operación son: Viscosímetro de Ostwald, Ubbelohde, Viscosímetro de rutina Cannon-Fenske que se detallan a continuación.

2.2.1.1.1 Viscosímetro de Ostwald.

En esencial, el Viscosímetro Ostwald es un tubo “U” una de sus ramas es un tubo capilar fino conectado a un deposito superior. El tubo se mantiene en posición vertical y se coloca una cantidad conocida del fluido al depósito para que luego fluya por gravedad a través de un capilar. Los procedimientos exactos para llevar a cabo estas pruebas estándar dado en los estándar de la American Society For Testing and Material (ASTM).

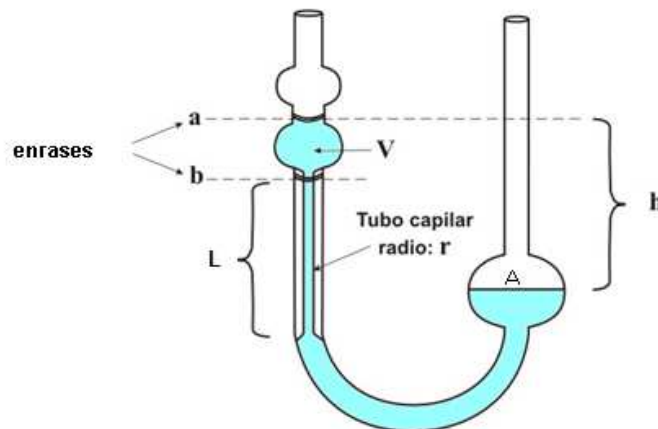


Figura 7. Viscosímetro de Ostwald.

El viscosímetro debe estar completamente seco, de ahí se procede a colocar la muestra a estudiar aproximadamente 7 ml, después se procede a colocar el viscosímetro en un baño maría. Con ayuda de una pipeta se succiona la muestra líquida hasta un punto **a**; desde ahí se mide el tiempo hasta que baje al punto **b**. En este método se hace una medición del tiempo necesario para que cierta cantidad de fluido (aceite) pase por un tubo capilar (o de calibre pequeño) de longitud y diámetros conocidos, bajo una diferencia medida y constante de presiones. Están gobernados por la ecuación de Hagen – Poiseuille, (ecuación 2.6):

$$\mu = \frac{\pi * \Delta p * r^4 * t}{8 * V * L}$$

Si el líquido fluye únicamente por acción de la gravedad en un tubo situado verticalmente, $\Delta p = \rho gh$; reemplazando este valor en la ecuación de Hagen-Poiseuille; siendo ρ : densidad del fluido y h la altura de la columna.

$$\mu = \frac{\pi * \rho gh * r^4 * t}{8 * V * L} \quad (2.7)$$

Todas las constantes de la ecuación 2.7 se pueden combinar en la constante K del viscosímetro:

$$K = \frac{\pi * r^4 * g * h}{8 * V * L}$$

Donde: V es el volumen del líquido que fluye a través de un capilar $[m^3]$ de radio r $[m]$ bajo la influencia de la gravedad g . La altura promedio de la columna del líquido en el viscosímetro durante la medición se denota como h , y L es la longitud del tubo capilar $[m]$.

Reemplazando el valor de K en la ecuación 2.7:

$$\mu = K * \rho * t [Pa * s] \quad (2.8)$$

Donde:

K : Constante del viscosímetro o constante viscosimétrica. $\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$

t : Tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la inferior (de **a** hasta **b**), $[s]$

La ecuación 2.8 permite determinar experimentalmente la viscosidad cinemática de un líquido para los viscosímetros de tubo capilar. El valor de K (constante del viscosímetro), depende por lo tanto de la geometría de cada viscosímetro en concreto y suele darlo el

constructor. También puede determinarse utilizando un líquido de viscosidad conocida. Normalmente se determinan las viscosidades relativas referidas al agua.

2.2.1.1.2 Viscosímetro de Ubbelohde.¹⁵

Éste viscosímetro se utiliza para determinar viscosidades cinemáticas de líquidos Newtonianos transparentes y de lubricante hidráulicos.

Llamado también el viscosímetro de nivel suspendido, el cual elimina el efecto de tensión superficial a la salida del tubo capilar. Además, éste instrumento, con previa calibración puede utilizarse para medir en forma directa y precisa la viscosidad de líquidos mediante la medición del tiempo de emanación del líquido en el viscosímetro, es decir, el tiempo en que un volumen dado del líquido fluye a través del capilar. Es importante hacer énfasis en que éste tipo de viscosímetro no es adecuado para efectuar estudios reológicos detallados de fluidos no – newtonianos ya que la velocidad de corte de la cual la viscosidad depende, es limitada y no uniforme.

¹⁵ <http://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-17.pdf>

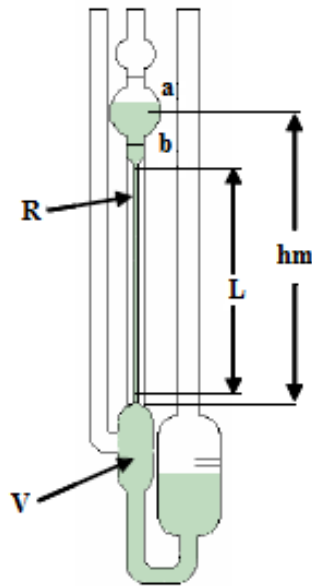


Figura 8. Viscosímetro Ubbelohde.

Éstos tipos de viscosímetros obedecen la ley de Hagen-Poiseuille como se dijo anteriormente (ecuación 2.6); el funcionamiento es similar al viscosímetro de Ostwald, la ecuación que permite calcular la viscosidad cinemática es:

$$\mu = K * \rho * t$$

$$v = Kt \quad (2.9)$$

Donde:

v: Viscosidad cinemática, $\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$

K: Constante del viscosímetro, $\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$

t: Tiempo en que el fluido cae de la marca superior a la inferior (de **a** hasta **b**), $[s]$

2.2.1.2 VISCOSÍMETROS ROTATORIOS.

Usan el torque de un eje rotatorio para medir la resistencia al flujo del fluido. Un viscosímetro de rotación se compone usualmente de un cilindro que gira dentro de un vaso de medición que contiene la muestra (figura 9). El rotor es accionado por un motor de corriente continua con velocidad fija o programada.



Figura 9. Viscosímetros Rotacionales.

Un taco generador regula el motor de manera exacta, detecta la mínima desviación y la corrige. La resistencia de la muestra a fluir provoca una pequeña torsión en el resorte de medición que se encuentra entre el motor y el árbol de accionamiento. Este movimiento se recoge mediante un traductor electrónico. Se transmiten a la unidad de control señales eléctricas proporcionadas a la torsión (momento angular) y al número de revoluciones para su procesamiento.

El resultado del ensayo produce tres magnitudes:

- El gradiente de velocidad $\left(\frac{dV}{dy}\right)$ seleccionado, proporcional a la velocidad.

- El esfuerzo de cizalla medido proporcional al par de torsión.
- La temperatura T, medida con preferencia directamente en la sustancia.

A continuación se detalla la clasificación de éstos tipos de viscosímetros:

2.2.1.2.1 Viscosímetro de Stormer¹⁶

En este equipo se determinan viscosidades de muestras a temperatura ambiente, ya que carecen de baño calefactor. Éste viscosímetro consta de dos cilindros concéntricos siendo el interior móvil y el exterior fijo (figura 10), colocándose el fluido cuya viscosidad se quiere determinar en el espacio comprendido entre estos.

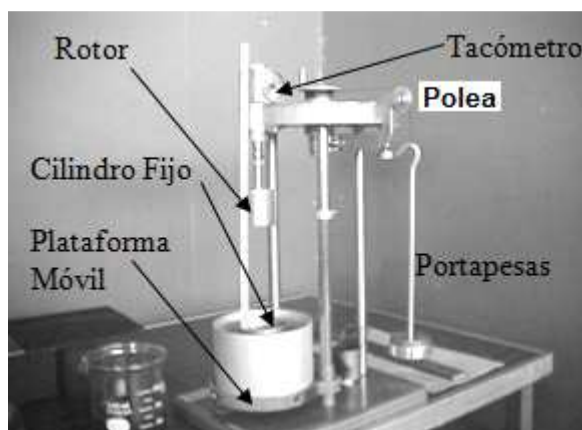


Figura 10. Viscosímetro de Stormer.

El cilindro interior se puede hacer girar por medio de un hilo enrollado en la polea superior y en cuyo extremo lleva un peso. Se puede deducir que, para éste equipo, la viscosidad se expresa en función del par necesario para hacer girar el cilindro interior a Ω_0 , rps (revoluciones por segundo) a partir de la siguiente fórmula:

¹⁶ <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mv?xid=194&tip=7>

$$\mu = \frac{P_n}{4\Omega_0 L \pi} \left[\frac{l}{r_2^2 - r_1^2} \right] [Pa * s] \quad (2.10)$$

Donde:

P_n : Par necesario, $[N * m]$

L : Longitud del cilindro interior, $[m]$

Ω_0 : Velocidad angular, $[rpm]$

r_1 : Radio del cilindro interior, $[m]$

r_2 : Radio del cilindro exterior, $[m]$

El par necesario se puede calcular conociendo el peso que se colocó en el extremo del hilo y el radio de la polea. Se utiliza con frecuencia para las medidas relativas de líquidos muy viscosos, de suspensiones, de pinturas, de productos alimenticios, etc.

El **funcionamiento** es el siguiente: primero se debe llenar con la muestra el espacio comprendido entre los dos cilindros, hasta sobre pasar ligeramente el borde superior del cilindro interior, luego se arrolla el hilo en la polea y se sujeta una pesa de más de 30 gramos al mismo. Se coloca el viscosímetro en un lugar elevado y se deja caer el peso, luego de algunas vueltas del cilindro interior se controla el tiempo que necesitó la pesa para caer una cierta distancia.

A partir de la longitud recorrida (L_r), el diámetro del cilindro interno (D_i) y el tiempo medido (t) se calcula el número de revoluciones por segundo (Ω_0).

$$\Omega_0 = \frac{L_r}{\pi * D_i * t} \left[\frac{l}{s} \right] \quad (2.11)$$

2.2.1.2.2 Viscosímetro de cono -placa.¹⁷

El viscosímetro de cono-placa no presenta una distribución compleja de fatiga de cizalla y velocidad de deformación en cizalla tal como la tienen el viscosímetro de cilindros coaxiales.

A una velocidad angular dada, la velocidad tangencial del componente matriz aumenta linealmente con el radio, y esto depende del espacio que hay entre el cono y la placa. La velocidad de deformación en cizalla y la fatiga de cizalla son uniformes en todo el fluido para ángulos pequeños que sean menores de 32 y no sería necesario hacer correcciones para los fluidos no – newtonianos.

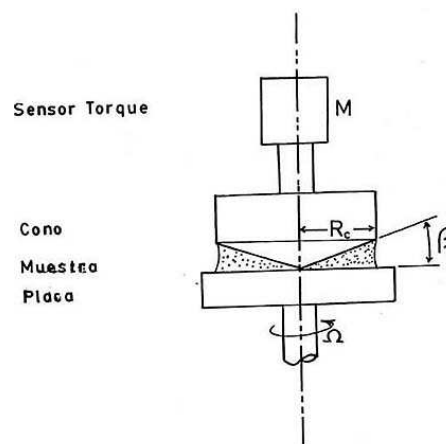


Figura 11. Viscosímetro de cono y placa.

Las relaciones que permiten el cálculo de las características reológicas son:

¹⁷ http://mazinger.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_quimicas_y_farmaceuticas/castroe11/vconplaca.htm

$$\tau = \frac{3M}{2\pi(R_C)^3} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (2.12)$$

Donde:

M: Torque, $[N * m]$

R_C : Radio del cono, $[m]$

$$\gamma = \frac{\Omega}{\beta} [s^{-1}] \quad (2.13)$$

Donde:

Ω : Velocidad angular o de rotación, $[rps]$

β : Ángulo entre el cono y la placa, $[^\circ]$

Por lo tanto para calcular la viscosidad absoluta experimentalmente es:

$$\mu = \frac{3}{2} * \frac{M * \beta}{\pi * \Omega * R_C^3} \quad (2.14)$$

El sistema presenta problemas con material de muy alta viscosidad debido a que el material tiende a abandonar el hueco entre el cono y la placa como por ejemplo los polímeros.

2.2.1.2.3 Viscosímetro de cilindros concéntricos o de Coutte.¹⁸

¹⁸ HANNIBAL BRITO: TEXTO BÁSICO DE FENÓMENO DE TRANSPORTE I, 31 - 33

Este equipo se emplea para medir viscosidades absolutas. Consiste en dos cilindros concéntricos, un cilindro interior y otro exterior, el cilindro exterior es hueco y el interior macizo; el interior permanece fijo mientras que el exterior se lo hace girar a velocidad angular (Ω) constante. Entre los dos cilindros existe un espacio en el cual se coloca el material del cual se quiere medir su viscosidad. El cilindro interior se suspende de un resorte o hilo, calibrados a torsión.

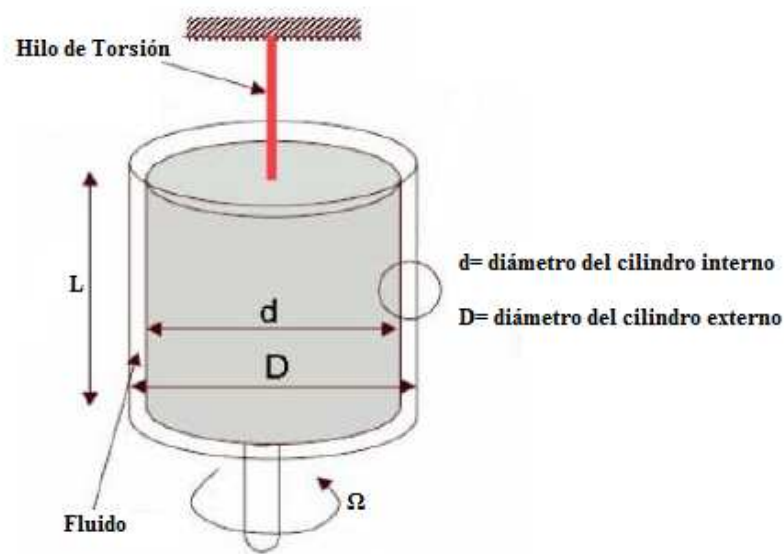


Figura 12. Viscosímetro de cilindros concéntricos.

La fuerza de corte unitario se obtiene dividiendo cada momento de torsión por el radio y el área exterior del cilindro interior:

$$\tau = \frac{M_t / r}{2\pi r * L} = \frac{M_t}{2\pi * r^2 * L} \quad (2.15)$$

Donde:

M_t : Momento de torsión, $\left[\frac{N}{m^2} \right]$

r : Radio del cilindro interno, ($d = 2r$), $[m]$

L: Altura de inmersión del cilindro que se desliza en el medio líquido, $[m]$

El gradiente de velocidad (figura 12) se obtiene de la velocidad dada a la superficie interior del cilindro exterior:

$$\omega = \frac{2\pi\Omega}{60}$$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{\Delta r} = \omega * (r + \Delta r) * \frac{l}{\Delta r}$$

$$r + \Delta r = R,$$

$$\Delta r = R - r$$

$$\gamma = \frac{\pi\Omega * R}{30(R - r)} \quad (2.16)$$

Donde:

Ω : Número de revoluciones por segundo (r.p.m.).

R: Radio del cilindro exterior ($D = 2R$); $[m]$

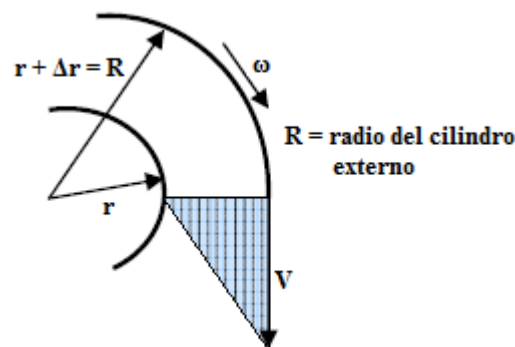


Figura 13. Variación de la velocidad.

Para calcular la viscosidad en forma experimental, se reemplaza las ecuaciones 2.15 y 2.16 en la ecuación de Newton:

$$\mu = \frac{15M_t * (R - r)}{\pi^2 r^2 \Omega L R} \quad (2.17)$$

2.2.1.2.4 Viscosímetro Brookfield.

Fue diseñado como un instrumento económico para uso fácil y de estimaciones reproducibles de viscosidad bajo ciertas condiciones de operación. Se usa principalmente para determinar la viscosidad a baja temperatura de aceites para engranajes, transmisiones automáticas, convertidores de torque y aceites hidráulicos para tractores, automóviles e industriales. La temperatura del ensayo se mantiene constante en el rango de -5 a -40°C.

El Viscosímetro Brookfield es de ejes simple, es más comercial, ampliamente utilizada en la industria alimenticia. Normalmente opera a ocho velocidades diferentes, y es cuestión de ensayar cuáles son el eje y la velocidad angular adecuados para un fluido particular. La técnica de ensayo Brookfield mide la viscosidad Brookfield de una muestra a medida que es enfriada a velocidad constante de 1 °C por hora, este método intenta correlacionar las características de bombeo de un aceite a baja temperatura. El ensayo informa el punto de gelificación, definido como la temperatura a la cual la muestra llega a 30.000 cP. El índice de gelificación se define como la relación entre la mayor velocidad de cambio en el incremento de la viscosidad desde -5 °C y la temperatura más baja del ensayo. Este método encuentra aplicación en aceites de motores, y es requerido por la ILSAC GF-2.

2.2.1.3 VISCOSÍMETROS EMPÍRICOS.

Estos viscosímetros se basan en el tiempo que requiere un determinado volumen de fluido en pasar libremente a través de un orificio normalizado. Se clasifican en:

2.2.1.3.1 Viscosímetro Saybolt.¹⁹

Se utiliza ampliamente con fines industriales comparativos sobre todo para los lubricantes y los productos petroleros.

El viscosímetro Saybolt (figura 18), es uno de los aparatos más utilizados, para obtener la viscosidad de un fluido (aceite), la cual se obtiene midiendo el tiempo en segundos que tarda en escurrir, a través de un orificio calibrado, 60 cm³ del mismo, a una temperatura determinada, que por lo general está entre 100°F (37,8°C) y 210°F (98,9°C). El equipo se completa con la resistencia de calentamiento, los termómetros y el agitador.

Existen dos tipos de puntas (diámetro de orificios calibrados de escurrimiento) para el Viscosímetro Saybolt:

- Punta Universal (SSU), líquidos livianos. Los valores de viscosidad se dan en segundos Saybolt Universal, abreviado SSU, a temperaturas especificadas que oscilan entre 21 y 99°C (70 y 210°F)
- Punta Furol (SSF), líquidos pesados donde los tiempos de caída sean superiores 250 segundos Saybolt Universal. Los valores de viscosidad se dan en segundos Saybolt

¹⁹ <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>

Furol, abreviado SSF, a temperaturas especificadas, que están entre 120 y 240°C (248 y 464°F).

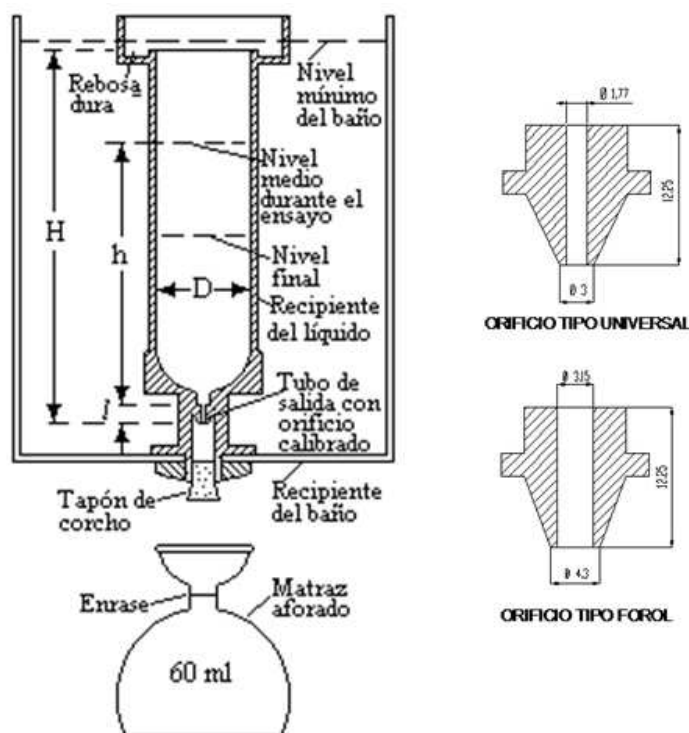


Figura 14. Viscosímetro Saybolt con los dos tipos de orificios.

Los equipos utilizados para ambos casos, difieren únicamente en los diámetros de los orificios calibrados de escurrimiento, siendo para Saybolt Universal $\varnothing = 1.77\text{mm} \pm 0,015\text{mm}$ y para Saybolt Furol $\varnothing = 3.15\text{mm} \pm 0,020\text{ mm}$.

El ensayo se realiza, previa colocación del tapón de corcho para impedir que caiga el líquido, introduciendo éste último en el recipiente del líquido, hasta que rebose el mismo. Se calienta el baño a la temperatura de medición y retirando el tapón, se lo deja caer en el matraz aforado (copa Saybolt), tomándose el tiempo con un cronómetro, hasta que el líquido llegue al nivel que indica la figura 14 (enrase). El tiempo así obtenido es la viscosidad en segundos Saybolt del líquido ensayado.

Herschel ha demostrado que la expresión que permite calcular la viscosidad cinemática experimentalmente es:

$$v = At - \frac{B}{t} \quad (2.18)$$

Donde A y B son constantes obtenidas experimentalmente y t el tiempo en segundos. Las constantes A y B para las viscosidades Saybolt, Redwood y Engler, se dan en la siguiente tabla:

Tabla IV. Constantes A y B.

Viscosidad	A	B
Saybolt	0.22	180
Redwood	0.26	171
Engler	0.147	374

Por lo tanto la relación aproximada entre la viscosidad y los segundos Saybolt se obtiene mediante:

$$v = 0.22 t - \frac{180}{t} \quad (2.19)$$

Donde:

v: Viscosidad cinemática, $[cSt]$

t: Tiempo de escurrimiento, $[s]$

2.2.1.3.2 Viscosímetro Redwood.

En Inglaterra se utiliza la viscosidad Redwood, que se obtiene de la misma manera que la Saybolt, difiriendo en el volumen que escurre, el cual es de 50 cm^3 , diferenciándose también dos tipos, según el diámetro del orificio de escurrimiento, el Redwood N°1, con orificio de salida de $\varnothing = 1,62 \text{ mm}$ y Redwood N°2, con orificio de salida de $\varnothing = 3,80 \text{ mm}$, obteniéndose la viscosidad en segundos Redwood.

2.2.1.3 Viscosímetro Engler.²⁰

La viscosidad Engler se utiliza en el continente europeo, y consiste en el cociente entre el tiempo en segundos que tarda en derramarse 200 cm^3 del líquido cuya viscosidad se desea conocer, y el tiempo en segundos que tarda en derramarse 200 cm^3 de agua, todo, por lo general, a 20°C de temperatura, pudiendo en los casos de líquidos muy viscosos utilizar temperaturas de 50°C y hasta 100°C . El equipo, consta, según muestra la figura (Fig.15), de dos recipientes, entre los que se vierte el aceite o el agua que constituirá el baño de calentamiento, y en el recipiente interior el líquido cuya viscosidad se desea medir; un tubo de salida de longitud l de 20 mm con orificios calibrados a la entrada de $\varnothing = 2,4 \text{ mm}$ y a la salida de $\varnothing = 2,8 \text{ mm}$, y un tapón de madera para impedir la caída del líquido hasta que no se obtengan las condiciones del ensayo; un matraz aforado para 200 cm^3 . El equipo se completa con los termómetros, agitador y sistema de calentamiento. Una vez obtenidas las condiciones de ensayo, se retira el tapón y se toma con un cronómetro el tiempo de caída del líquido, dividiéndose por el tiempo de caída del agua, cuyo valor constituye la constante del aparato, variando entre 51 y 52 segundos a 20°C , obteniéndose un número que da la viscosidad en grados Engler (°E).

²⁰ <http://www.construsur.com.ar/News-sid-128-file-article-pageid-3.html>

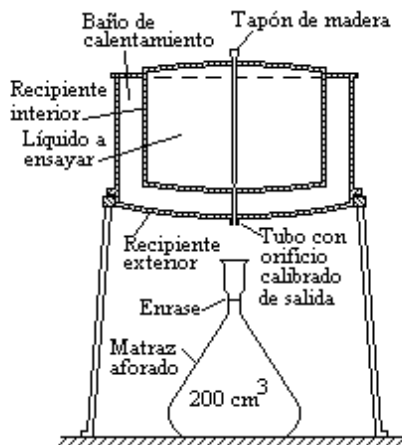


Figura 15. Esquema de un viscosímetro Engler.



Figura 16. Viscosímetro Engler.

2.2.1.4 VISCOSÍMETRO DE HOPPLER.

Cuando un cuerpo cae en un fluido bajo la sola influencia de la gravedad, se acelera hasta que la fuerza que lo jala hacia abajo (su peso) queda balanceada por la fuerza de flotación y la fuerza de arrastre viscoso que actúan hacia arriba. La velocidad que adquiere en ese momento se conoce como velocidad terminal. Éste viscosímetro utiliza el principio de que una bola esférica caiga libremente a través del fluido y midiendo el tiempo requerido para que ésta recorra una distancia conocida.

2.2.1.4.1 Viscosímetro de caída de bola.²¹

Este equipo se utiliza para determinar las viscosidades de fluidos Newtonianos y gases (con una bola especial para gases), entre sus aplicaciones figuran la investigación, el control de procesos y el control de calidad. Consta de un simple tubo de vidrio (figura 17), de diámetro pequeño con un ángulo de 180°, que se rellena con el líquido problema y por él se introduce una esfera sólida de diámetro menor para calcular la viscosidad del fluido. Este viscosímetro determina la viscosidad de líquidos midiendo el tiempo de caída de una esfera sólida necesita para recorrer una distancia entre dos puntos de referencia dentro del tubo de vidrio inclinado con muestra. El **funcionamiento** es el siguiente: primeramente se llena la sustancia que va a ser estudiada en el tubo de caída del viscosímetro, en el cual la bola debe caer una distancia calibrada de 100 mm. A partir del tiempo de caída t respectivamente se obtiene la viscosidad dinámica (μ) del líquido según la ecuación de Stokes:

$$\mu = \frac{2}{9} r^2 \frac{g(\rho_s - \rho_L)}{V} [Pa * s] \quad (2.20)$$

Donde:

ρ_s : Densidad de la esfera, $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

ρ_L : Densidad del líquido, $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

r : Radio de la esfera, $[m]$

V : Velocidad límite alcanzada por la esfera, $\left[\frac{m}{s} \right]$

²¹ <http://www.quantotec.com/sp/Visco-bola.htm>

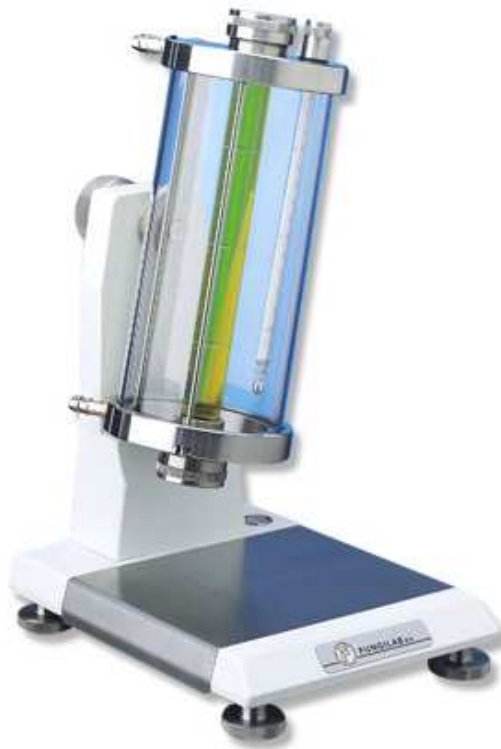


Figura 17. Viscosímetro de Caída de Bola.

Esta ecuación es válida siempre y cuando la esfera caiga en régimen laminar y el diámetro de ésta sea pequeño comparado con el diámetro del tubo. Se considera que el régimen es laminar cuando el número de Reynolds definido por: $Re = \rho_L v_1 d / \mu$ sea menor a 0,1.

Faxen modifica el resultado obtenido mediante la expresión anterior para tener en cuenta los efectos perturbadores que pueda tener la pared del tubo de la siguiente manera:

$$\mu_F = F * \mu_S \quad (2.21)$$

Donde:

μ_S : Viscosidad según Stokes

μ_F : Viscosidad corregida según Faxen

El factor de Faxen (F) está dado por:

$$F = 1 - 2.104 \frac{d}{D} + 2.09 \left(\frac{d}{D} \right)^3 - 0.905 \left(\frac{d}{D} \right)^5 \quad (2.22)$$

Donde:

d: Diámetro de la esfera.

D: Diámetro del tubo capilar.

Este viscosímetro se utiliza principalmente para sustancias de baja viscosidad, entre 0.6 y 100.000 mPa*s, como:

- Industrias de aceites minerales (aceites, líquidos hidrocarburos).
- Industria alimentaria (soluciones de azúcar, miel, cerveza, leche, gelatina, zumo de frutas).
- Industria química (soluciones de polímero, disolventes, soluciones de resina, dispersiones de látex, soluciones adhesivas)
- Industria Cosmética/Farmacéutica (glicerinas, emulsiones, suspensiones, soluciones, extractos).
- Industria petrolera (crudo, aceite para máquinas).
- Industria papelera (emulsiones, dispersiones de pigmentos, aditivos del papel).
- Pinturas y barnices (tintas para impresión, acuarelas).

2.3 ACEITES LUBRICANTES.

Concepto de lubricantes.

Se llama lubricante a toda sustancia sólida, semisólida o líquida de origen animal, mineral o sintético que, puesto entre dos piezas con movimiento entre ellas, reduce el rozamiento y facilita el movimiento.

Además, los lubricantes, según sus características, pueden cumplir otras misiones: Sellar el espacio entre piezas, dado que las superficies metálicas son irregulares a nivel microscópico, el lubricante llena los huecos. En los motores de explosión este sellado evita fuga de combustibles y gases de escape y permiten un mejor aprovechamiento de la energía.

2.3.1 Funciones de los lubricantes.²²

- Los lubricantes deben reducir al máximo los rozamientos de los órganos móviles facilitando el movimiento, mejorando el rendimiento del motor y disminuyendo el consumo de carburante.
- Soportar grandes presiones.
- Actuar como fluido hidráulico.
- Mantener la viscosidad poco variable ante los cambios de temperatura.
- Actuar como refrigerante; es decir evacuar de manera eficaz el calor, enfriando el motor para evitar la deformación de las piezas.
- Proteger los órganos mecánicos contra el desgaste y la corrosión para garantizar la eficacia del motor.

²² ING. CUADRADO SAMANIEGO EDWIN: MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, 65 - 66

- En general dar un buen servicio y protección a las partes mecánicas, en todas las temperaturas y por un largo período de tiempo.

2.3.2 **Clasificación de los lubricantes.**²³

a) **Conforme a su origen.**

Conforme a su origen los lubricantes pueden clasificarse en:

- Los aceites vegetales como el de oliva o colza.
- Animales.
- Minerales como el de petróleo o la hulla.

b) **Conforme a su estado.**

Conforme a su estado, los lubricantes pueden clasificarse en:

- Líquidos como el aceite.
- Sólidos como la grasa.
- Semisólidos como el grafito.
- Gaseosos.

2.3.3 **Propiedades físicas de los lubricantes.**

Los aceites lubricantes se distinguen entre sí según sus propiedades o según su comportamiento en las máquinas. Debemos de conocer las propiedades de los aceites lubricantes, para poder determinar cual utilizaremos según la misión que deba desempeñar.

²³ http://html.hidráulica de mansé.com/hidráulica_7.html

Un buen aceite lubricante, a lo largo del tiempo de su utilización, no debe formar excesivos depósitos de carbón ni tener tendencia a la formación de lodos ni ácidos; tampoco debe congelarse a bajas temperaturas. Los aceites lubricantes, se seleccionan de acuerdo a las siguientes propiedades físicas:

- 1) Viscosidad.
- 2) Punto de inflamación.
- 3) Punto de fuego.
- 4) Punto de fluidez.
- 5) Residuos de carbón.
- 6) Color.
- 7) Índice de viscosidad.
- 8) Gravedad API.

2.3.3.1 Viscosidad.

Probablemente la viscosidad es la propiedad individual más importante del lubricante y por la que se lo clasifica, la cual nos indica su fricción interna. Si un aceite no tuviera nada de viscosidad (fricción interna), éste se escurriría por entre las partes metálicas, dejando a las mismas sin lubricación. Pero, no todo es perfecto, la viscosidad también produce fricción, siendo gastada aproximadamente un 15% de la potencia producida por un motor de combustión en vencer esta fricción.

2.3.3.2 Punto de inflamación.

Es la temperatura a la cual el aceite emana vapores en cantidades suficientes como para ser encendidos en presencia de llama abierta. El método estándar ASTM D92 se utiliza

en los aceites lubricantes para probar los puntos de inflamación y de fuego o ignición por medio del ensayador de copa abierta.

2.3.3.3 Punto de fuego o ignición.

Es la temperatura a la cual el aceite permanece encendido. Esta temperatura generalmente es de 20°F más elevada que el punto de chispa de desprendimiento de gases, y se toma en el instante que en el interior de la copa se forma una llama que persiste durante 5 segundos.

2.3.3.4 Punto de fluidez.

Un indicador de la habilidad de un aceite fluir a bajas temperaturas de operación. Es la más baja temperatura a la cual el lubricante fluirá cuando es enfriado bajo condiciones prescritas (ASTM D97).

2.3.3.5 Residuos de carbón.

Material remanente después de calentar un aceite en condiciones especificadas, a temperatura elevada, es útil como un medio de control de calidad con la refinación de aceites viscosos. Esto no tiene correlación con las tendencias a formar carbón de los aceites en los motores de combustión interna. La determinación se hace con mayor frecuencia por el procedimiento de Conradson (ASTM D189).

2.3.3.6 Color.

El color de un aceite indica la uniformidad de un grado o marca particular y no su calidad. La prueba ASTM D1500 se usa para la determinación visual del color de los aceites lubricantes.

2.3.3.7 Índice de viscosidad (IV).

Número empírico que indica el grado de cambio de la viscosidad cinemática de un lubricante con la temperatura, o mejor dicho el grado que el aceite resiste al adelgazamiento con un aumento de la temperatura. Un aceite de motor multigrado resiste el adelgazamiento mejor que un aceite monogrado de motor, cuando la temperatura se incrementa.²⁴

2.3.3.8 Gravedad API (Instituto Americano del Petróleo).

Los aceites de baja viscosidad tienen gravedad API más alta que los aceites de viscosidad mayor. Los aceites parafínicos tienen las gravedades API más altas, los nafténicos son intermedios y los aceites animales y vegetales son los más pesados o más bajo de gravedad API

2.3.4 Características de un lubricante.

2.3.4.1 Grado de viscosidad SAE (Society of Automobile Engineers).²⁵

²⁴ VADEMECUM DE LUBRICACIÓN: TRIBOLOGY TECH – LUBE, 164.

²⁵ http://html.rincondelvago.com/termodinamica_7.html

Los aceites lubricantes para vehículos son frecuentemente clasificados de acuerdo a una serie de números llamados SAE, organización constituida en los Estados Unidos, una de cuyas finalidades era introducir una nomenclatura STANDARD mundial para clasificación de aceites de motor. La Sociedad de Ingenieros Automotores de EE.UU. (SAE) clasificó a los aceites según su viscosidad adoptando como temperatura de referencia 100 grado centígrado y manteniendo la viscosidad en Centistoke (cSt). Los lubricantes entran básicamente en dos categorías como se ilustra en la Tabla V: los monogrados y los multigrados.

Tabla V. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.

Grado SAE	Viscosidad cinemática a 100°C	
	Valor Mínimo	Valor Máximo
Aceites Multigrados		
OW	3,8	-----
5W	3,8	-----
10W	4,1	-----
15W	5,6	-----
20W	5,6	-----
25W	9,3	-----
Aceites Monogrados		
20	5,6	< 9,3
30	9,3	< 12,5
40	12,5	< 16,3
50	16,3	< 21,9
60	21,9	< 26,1

Esta clasificación no tuvo en cuenta que un aceite SAE 20 en condiciones de baja temperatura aumentaba considerablemente su viscosidad no siendo apto para una operación correcta en climas fríos. Surgen así los aceites tipo W (Winter: invierno) que cubrirían esta deficiencia. Se amplió entonces la clasificación incorporando los grados SAE 5W, SAE 10W, SAE 20W a los ya existentes, como se ilustra en la Tabla V. En la figura 18 se tiene valores de viscosidades de un aceite de grado SAE a diferentes temperaturas.

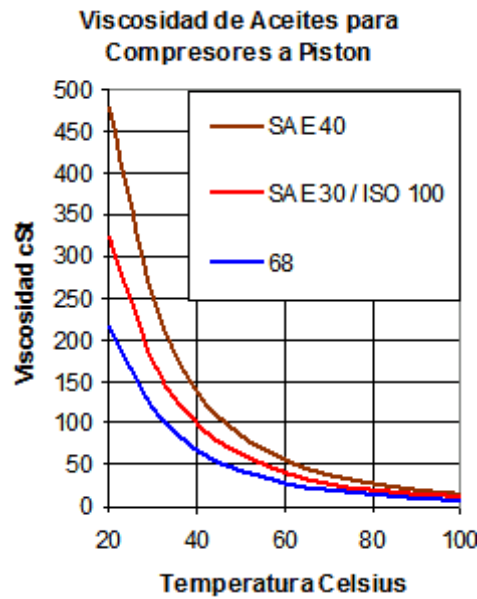


Figura 18. Viscosidad dinámica de diferentes aceites SAE a diferencias temperaturas.

Aceites multigrados.

Los lubricantes que pueden mantener su rendimiento en temperaturas altas y bajas se llaman multigrados. Se definen con dos números: El primero (seguido por una W) indica la viscosidad del lubricante a bajas temperaturas, mientras que el segundo número indica la viscosidad del lubricante a altas temperaturas. Un aceite multigrado reduce al mínimo las diferencias de viscosidad cuando hay variaciones de temperatura.

De esta manera se obtienen aceites denominados multigrados generalmente designados: SAE 10W-30, SAE 85W-40, SAE 5W – 30, etc. En la figura 19 se ilustra varios tipos aceites multigrados a diferentes temperaturas. En el Anexo E, figura E-1 y figura E-2 se presentan estos tipos de aceites.

Las ventajas de usar aceites multigrados son:

- Facilidad de arranque en frío.
- Rápida entrada en régimen térmico del motor.

- Ahorro de baterías y sistemas de arranque.
- Adecuada viscosidad en todo el rango de temperatura.

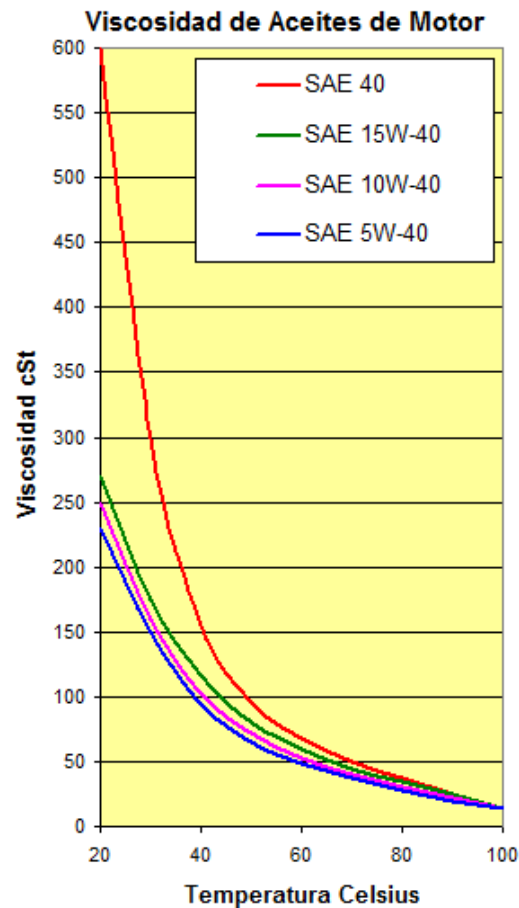


Figura 19 Viscosidad dinámica de varios aceites multigrados.

2.3.4.2 Clasificación API para aceites de motor.²⁶

Con el fin de facilitar una correcta elección del lubricante que mejor responda a las exigencias específicas de los diversos tipos de motores y servicios, el Instituto Americano del Petróleo, API (se rige a la calidad o el comportamiento del aceite), estableció una clasificación de los aceites en dos tipos: aceites para motores nafteros y aceites para motores

²⁶ ING. CUADRADO SAMANIEGO EDWIN: MANTENIMIENTO INDUSTRIAL, 74 - 75

Diesel. De esta forma, para motores a gasolina (Tabla VI) se estableció la letra “S” de Spark (bujía en inglés) para relacionar con el principio de ignición por chispa que se utiliza en este tipo de motores, seguidas de las letras “A” hasta la “L”; estas letras indican las exigencias en servicio o el grado de desempeño.

Tabla VI. Grado de viscosidad API para motores a gasolina.

Nivel de calidad	Descripción
SA	Aceite básico sin contenido de aditivos. Esta categoría no tiene requerimientos de desempeño. No debe ser usada en ningún motor a menos que el fabricante del equipo lo recomiende específicamente
SB	Aceite básico con cierto contenido de aditivos. No debe ser usada en ningún motor a menos que el fabricante del equipo lo recomiende específicamente.
SC	Servicio típico de motores a gasolina en automóviles y algunos camiones de los modelos 1964 a 1967, operando bajo las garantías de los fabricantes de motor durante los años de estos modelos.
SD	Servicio típico de motores a gasolina en automóviles y algunos camiones de los modelos 1968 a 1970, operando bajo las garantías de los fabricantes de motor durante los años de estos modelos.
SE	Servicio típico de motores a gasolina en automóviles y algunos camiones de los modelos 1972 y ciertos modelos de 1971 a 1979, operando bajo las garantías de los fabricantes de motor durante los años de estos modelos. Sustituyen a la clasificación SD o SC por lo que pueden ser utilizados en motores de años anteriores.
SF	Servicio típico de motores a gasolina en automóviles y algunos camiones de los modelos 1980 a 1988, operando bajo las garantías de los fabricantes de motor durante los años de estos modelos. Sustituyen a la clasificación SE.
SG	Servicio típico de motores a gasolina más recientes y de algunos motores diesel de los modelos 1989. Sustituyen a la clasificación SF, SE y SF / CC o SE / CC por lo que pueden ser utilizados en motores de años anteriores.
SH	Servicio típico de los motores de gasolina en modelos actuales y anteriores de automóviles de pasajeros, furgonetas y camiones ligeros en operación bajo los procedimientos de mantenimiento recomendados por el fabricante del vehículo. Sustituye a la clasificación SG por lo que puede ser utilizada en motores de años anteriores.
SJ	Servicio típico de los motores de gasolina en modelos actuales y anteriores de automóviles de pasajeros, furgonetas y camiones ligeros a partir del 15 de octubre de 1996.
SL	2001

En cuanto a los aceites para motores diesel, la nomenclatura utiliza la letra "C" de la palabra inglesa Compression por tratarse de aceites para motores cuyo principio de ignición es por compresión y una letra en serie alfabética que representa la evolución del nivel de calidad.

Esta evolución se expone en la siguiente tabla:

Tabla VII. Grado de viscosidad API para motores a diesel.

Nivel de calidad	Descripción
CA	Aceite básico utilizado en la década de los años 40. Esta categoría no tiene requerimientos de desempeño. No debe usarse en ningún motor a menos que el fabricante del equipo lo recomiende específicamente.
CB	Aceite básico utilizado e introducidos en el año 1949. Esta categoría no tiene requerimientos de desempeño. No debe ser usada en ningún motor a menos que el fabricante del equipo lo recomiende específicamente.
CC	Servicio típico de motores diesel y ciertos motores a gasolina de trabajo pesado. Fueron introducidos en 1961. Pueden ser utilizados en motores fabricados en años anteriores.
CD	Servicio típico de motores diesel de aspiración natural, turbocargados o supercargados, fueron introducidos en 1955. Pueden ser utilizados en motores fabricados en años anteriores.
CD - II	Servicio típico de algunos motores diesel de dos tiempos que operan en condiciones severas y requieren un control del desgaste y depósitos. Satisfacen todos los requerimientos de rendimiento de la categoría de servicio CD.
CE	Servicio típico de motores diesel de trabajo pesado turbocargada y sobrecargada fabricados a partir de 1983 y operando bajo las condiciones de baja velocidad y alta carga y de alta velocidad y alta carga.
CF	Servicio típico de motores diesel de inyección indirecta que utilizan combustibles con alto contenido de azufre (más de 0.5 % en peso). Fabricados a partir del año 1994.
CF-2	Servicio típico de algunos motores diesel de dos tiempos que requieren un control altamente efectivo sobre el frotamiento y los depósitos en los cilindros y las caras de los anillos.
CF-4	Servicio típico de algunos motores diesel de cuatro tiempos de alta velocidad, están diseñados para reemplazarlos a partir de 1994 y proporcionan un control mejorado del consumo de aceite y depósitos en el pistón.
CG-4	Servicio típico de algunos motores diesel de cuatro tiempos de alta velocidad usados en equipos de carretera y fuera de carretera donde el contenido de azufre del combustible es menos del 0.5 % en peso. Aceites designados para cumplir con los estándares de emisiones de los USA a partir de 1994.
CH-4	Servicio típico de algunos motores diesel de cuatro tiempos de alta velocidad. Introducido en Diciembre 1, 1998. Los aceites CH-4 son especialmente compuestos para uso con combustibles diesel con un contenido de azufre arriba de 0.5 % peso. Aceites designados para cumplir con los estándares de emisiones de los USA a partir de 1998.

2.3.4.3 Grado de viscosidad ISO para aceites lubricantes.²⁷

La International Standards Organization (ISO) ha publicado un sistema para designar los grados de viscosidad de los aceites industriales y la ASTM lo ha aceptado. Como se establece en la ASTM D2422, cada grado se especifica por ISO VG, seguido por un número que es la viscosidad cinemática nominal, en cSt, a 40°C. En la Tabla VIII se muestran estos

²⁷ AVALLONE EUGENE, BAUMEISTER THEODORE: MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO, 6-223.

tipos de aceites lubricantes. En el Anexo E figura E-3 se ilustra estos tipos de aceites a diferentes temperaturas.

Tabla VIII. Grado de viscosidad ISO.²⁸

Grado ISO VG	Viscosidad cinemática cSt @ 40°C		
	Nominal	Mínimo	Máximo
2	2,2	1,98	2,4
3	3,2	2,88	3,52
5	4,6	4,14	5,06
7	6,8	6,12	7,48
10	10	9	11
15	15	13,5	16,5
22	22	19,8	24,2
32	32	28,8	35,2
46	46	41,4	50,6
68	68	61,2	74,8
100	100	90	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	506
680	680	612	748
1000	1000	900	1100
1500	1500	1350	1650

El aceite que se utilizó en la elaboración de la tesis para la selección de algunos parámetros tales como la potencia que se requiere en las resistencias eléctricas para el calentamiento del agua, el tiempo que tarda en llegar a una temperatura máxima, etc.; fue el **SYNTEMP 2000**, que es uno de los aceites más pesados que existen en el mercado.

²⁸ MOTT ROBERT: MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA, 39.

2.3.5 **SINTEMP 2000**²⁹

Lubricante sintético en forma de aerosol para altas temperaturas. Por su alta estabilidad térmica este lubricante puede trabajar hasta 280°C.

Su larga duración y alto nivel de desempeño permite su uso amplio en cadenas, cables, engranajes, husos, corredoras, pines y todos los accesorios donde se presenten fuertes puntos de fricción en las industrias: plástica, textil, gráfica, metal mecánica, papelera, química, producción de agua potable y electricidad. En la Tabla IX se detallan algunas características de este lubricante que se tomo en cuenta para el cálculo posterior.

Tabla IX. Características del lubricante SYNTEMP 2000.

Características SYNTEMP 2000	
Viscosidad	
cSt @ 40°C	1018
cSt @ 100°C	74.9
SUS @ 100°F	5000
SUS @ 210°F	145
Indice de viscosidad	145
Punto de inflamación °F/°C	545/285
Punto de goteo °F/°C	0,2

²⁹ VADEMECUM DE LUBRICACIÓN: TRIBOLOGY TECH – LUBE, 65 - 66

2.3.6 Cálculo del efecto de la temperatura sobre los aceites lubricantes.³⁰

Normalmente los aceites se usan dentro de un rango de temperaturas en el Ecuador, que va desde los 40°C hasta los 100°C.

Para calcular aproximadamente qué porcentaje de su viscosidad pierde un aceite por cada incremento de 10°C desde 40 °C hasta 100°C y determinar cuál es la viscosidad de trabajo real es la siguiente ecuación:

$$REL X = \left(\frac{cSt a 100^{\circ}C}{cSt a 40^{\circ}C} \right) * 1000 \quad (2.23)$$

Donde:

REL X: Relación de permanencia de viscosidad.

cSt a 100°C, cSt a 40°C: Características del lubricante evaluado a esas temperaturas.

Entonces la correlación de permanencia (Anexo C) de viscosidad por cada 10°C de incremento de temperatura es igual a un factor menor que 1, que nos permite calcular, aproximadamente la viscosidad de servicio, a una temperatura dada del aceite lubricante con el que se trabaja.

Para encontrar el valor de la correlación de permanencia (CP) se procede de la siguiente manera: con el valor calculado de REL X (Relación de permanencia), se va a la Tabla en Anexo C y se encuentra CP.

³⁰ VADEMECUM DE LUBRICACIÓN: TRIBOLOGY TECH-LUBE; 150 - 152

- Para determinar la viscosidad real de trabajo para una temperatura de 40°C hasta 100°C, se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Viscosidad a } X = (\text{Viscosidad a } 40^{\circ}\text{C}) * (CP)^n \quad (2.24)$$

Donde:

Viscosidad a X: Viscosidad del aceite evaluado a la temperatura que se desea conocer su viscosidad real de trabajo.

CP: Correlación de permanencia: Anexo C.

n: Factor de incremento de temperatura; n por cada aumento de 10°C es igual a 1.

- Para determinar la viscosidad real de trabajo para una temperatura de 15°C hasta 40°C, se procede a utilizar la siguiente ecuación:

$$\text{Viscosidad a } X = \frac{\text{Viscosidad a } 40^{\circ}\text{C}}{(CP)^n} \quad (2.25)$$

2.4 SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO MÁS ADECUADO PARA ACEITES DERIVADOS DEL PETRÓLEO.

La máquina a ejecutarse debe cumplir con determinados requisitos para una eficiencia en la operación y así obtener el menor error posible, además de los parámetros funcionales se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos para su selección:

- **Facilidad tecnológica de construcción en nuestro medio.**

El viscosímetro en cuestión deberá poder ser construido con materiales de fácil acceso en el medio. En primer lugar deberá seguirse las normativas correspondientes a la

construcción del viscosímetro, es decir del medidor en sí, teniéndose los cuidados respectivo en relación a medidas, tolerancias y acabados superficiales. Posteriormente se procederá a dimensionar y diseñar la bancada para el equipo, la misma que deberá permitir al usuario una fácil manipulación de todos los instrumentos y elementos, las pruebas de medición de viscosidad se realizarán sin inconvenientes y que finalmente brinde las seguridades a los operarios.

- **El control de temperatura debe ser estricto.**

Una buena medición de viscosidad sólo puede ser considerada si las condiciones en las que se lleva a cabo la misma son las idóneas. El factor más crítico para aquello es la temperatura. Más aún cuando la viscosidad es exclusivamente función de la temperatura. Para tener el mejor control sobre ésta variable se deberá modelar el sistema dinámico correspondiente al proceso de medición de viscosidad, luego simular su comportamiento en el dominio del tiempo para finalmente seleccionar en base a estos criterios los elementos de medición o sensores, el controlador (o controladores) y el elemento final de control.

Como uno de los objetivos del proyecto es permitir que el banco además de medir viscosidades se pueda tener alguna técnica de control especial se ha optado por implantar un sistema de control en cascada, este tipo de control debería permitir a los usuarios que se puedan hacer algunas prácticas de control.

- **Bajo costo.**

En comparación con un equipo de fábrica cuyo valor fácilmente puede superar los 12 000 dólares, el equipo proyectado además de ser normado, de fácil manipulación y control apropiado debe tener un costo relativamente bajo para que el proyecto tenga rentabilidad. Para

lograr esto se debe tener el máximo cuidado en el momento de diseñar el equipo y el sistema, hacer un cuidadoso seguimiento de la construcción y montaje para finalmente instalar correctamente los instrumentos electrónicos de control.

- **Sencillez de operación y mantenimiento.**

La manipulación del equipo tiene que ser fácilmente operada, así luego de la construcción, pruebas y adecuaciones se deben efectuar un manual de operación funcional para que los usuarios del equipo tengan acceso rápido a la operación del equipo. El equipo deberá ser de fácil desmontaje para efectuar operaciones de mantenimiento sobre él. Cabe señalar que el mantenimiento deberá ser realizado siguiendo estrictamente el manual que se realice para el efecto.

Además de los puntos señalados anteriormente es preciso destacar que si bien es cierto que existe una gran gama de equipos para medir viscosidad así como amplia variedad de tipos de viscosímetros se debe tener en cuenta que uno de los objetivos a cumplir es diseñar un sistema de control que pueda servir también como guía de aprendizaje. El viscosímetro Saybolt Universal es el que permite adecuar a su funcionamiento un sistema de control en cascada.

2.5 TRANSFERENCIA DE CALOR

Es el proceso por el cual se cambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a diferentes temperaturas. La transferencia de calor se efectúa siempre de manera espontánea del cuerpo más caliente al cuerpo más frío. Los mecanismos de Transferencia de calor son tres:

- **Conducción.**

- Convección.
- Radiación.

Para la realización del proyecto, se analizará la transferencia de calor por conducción y convección que están presentes en este equipo (Viscosímetro Saybolt Universal).

2.5.1 ELEMENTOS DE CALORIMETRÍA.

2.5.1.1 Calor específico (C_p) o capacidad calorífica.

Se define como: “La cantidad de calor que se añade a una sustancia para producir un incremento en su temperatura (en el caso del proyecto se encienden las resistencias eléctricas para incrementar la temperatura del fluido), bajo condiciones especiales y cuidadosamente controladas.”³¹ Esto puede expresarse como:

$$Q = m * C_p * \Delta T \quad (2.26)$$

Donde:

- Q: Flujo de calor suministrado.
 m: Masa de la sustancia.
 C_p : Calor específico.
 ΔT : Variación de la temperatura.

³¹ ING. SANTILLAN RODOLFO: TERMODINÁMICA BÁSICA, 27-28

Para la determinación del calor específico de aceites derivados del petróleo se presenta la siguiente ecuación empírica³²:

$$C_p = \frac{0.388 + 0.00045t}{SG^{0.5}} \quad (2.27)$$

Donde:

C_p : Calor específico; está en $\left[\frac{Btu}{lb \cdot ^\circ F} \right]$

t: Temperatura promedio a la cual va a ser evaluado el aceite; $[^\circ F]$

SG: Gravedad específica del líquido (aceite) a 60°F/60°F.

La ecuación 2.27 es directamente aplicable para 32°F < t < 400°F, y para 0.75 < SG < 0.96.

2.5.1.2 Conductividad térmica (k).

Se define a la conductividad térmica como “la cantidad de calor, q, transferida en un tiempo τ , a través de una longitud L, en una dirección perpendicular a una superficie de área A, debido a una diferencia de temperatura ΔT .” La conductividad térmica es una propiedad de transporte que provee una indicación de la velocidad con que la energía es transferida por el proceso de difusión.

³² PERRY ROBERT: BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUÍMICO, 3-296.

Para fracciones de petróleo y mezclas de aceite (aceites derivados de petróleo), Smith recomendó un valor simple de 0.079 (Btu/ h* ft* °F) a 30°C. A otras temperaturas, es satisfactorio la ecuación empírica de Craoge:³³

$$k = \frac{0.067}{SG} [1 - 0.0003(t - 32)] \quad (2.28)$$

Donde:

k: Conductividad térmica, está dado en: $\left[\frac{Btu}{h * ft * ^\circ C} \right]$

SG: Gravedad específica o peso específico a 60°F/60°F.

t: Temperatura promedio a la cual está siendo evaluada el aceite; $[^\circ F]$

2.5.2 TRANSMISIÓN DEL CALOR POR CONDUCCIÓN.

La transferencia de calor por conducción, es el proceso mediante el cual fluye calor a través de un sólido. En este tipo de proceso, el calor se transfiere mediante un complejo mecanismo submicroscópico en el que los átomos interactúan a través de choques elásticos e inelásticos para propagar la energía desde las regiones con mayor temperatura hacia las que tienen menor temperatura.

La transferencia de calor por conducción generalmente se da en los sólidos pero puede presentarse también en líquidos o en gases bajo ciertas circunstancias como lo son las condiciones cercanas al reposo. Como se enunció anteriormente este tipo de transferencia de calor está presente en este equipo (tesis) el cual se transfiere el calor de la siguiente manera (figura 20): El fluido que baña al viscosímetro (baño maría) está a una temperatura T1 (T1 >

³³ PERRY ROBERT & CHILTON CECIL: BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUÍMICO, 3-304.

T2) el que transfiere la energía térmica por medio de la conducción hacia el otro extremo del viscosímetro (espesor e) el cual contiene el aceite a ensayar que está a una temperatura T_2 .

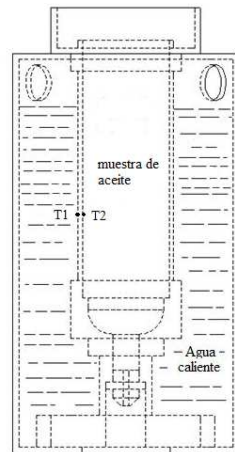


Figura 20. Transmisión de calor por conducción en la pared del viscosímetro.

La ecuación que predice la disipación de calor por un mecanismo de conducción es la ley de Fourier. Los metales (por ejemplo el cobre) son usualmente los mejores conductores de energía térmica. Esto es debido a la manera como los metales están enlazados químicamente.

En 1822, Fourier propuso relacionar el flujo de calor con este gradiente mediante una ley lineal; en el cual la temperatura varía en las tres direcciones:

$$Q = -kA \frac{dT}{d_n} [W] \quad (2.29)$$

Donde:

Q: Flujo de calor; $[W]$

A: Área de transferencia de la isoterma, perpendicular a la dirección de flujo de calor;
 $[m^2]$

n: Coordenada plana, cilíndrica o esférica.

k: Conductividad térmica del material; $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

dT/dn : Gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor (n), $\left[\frac{^\circ C}{m} \right]$

2.5.2.1 Conducción de calor en paredes cilíndricas.

Para las condiciones preestablecidas de conducción de calor en estado estable, unidireccional, material homogéneo, analizaremos una pared cilíndrica (figura 21) de radio interior r_i y de radio exterior r_o , las superficies interior y exterior se mantiene a T_1 y T_2 respectivamente; se tomó éste caso porque tanto el recipiente (baño maría) como el viscosímetro presentan ésta forma.

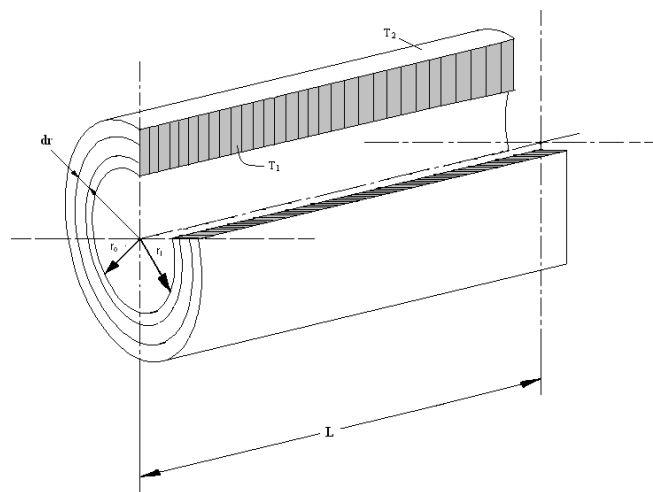


Figura 21. Cilindro.

Partiendo de la ecuación de Fourier:

$$Q = -kA_r \frac{dT}{dr}$$

Donde: $A_r = 2\pi r L$, que es el área del cilindro perpendicular a la dirección del flujo.

$$Q = -k * (2\pi r L) \frac{dT}{dr}$$

$$Q \frac{dr}{r} = -2\pi k L dT$$

$$Q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2\pi k L \int_{T_i}^{T_o} dT$$

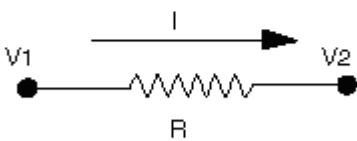
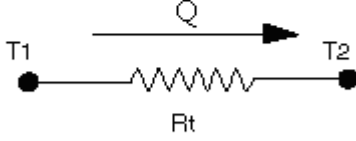
$$Q = \frac{2\pi k L}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} (T_i - T_o) \quad (2.30)$$

2.5.2.2 Analogía termo-eléctrica³⁴.

Es posible establecer una analogía entre el flujo de calor y el flujo eléctrico como se ilustra en la Tabla X.

Tabla X. Analogía Termo-eléctrica.

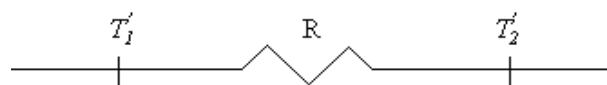
³⁴ PARISIENNE COMPAGNIE: VAPOR DE AGUA, TEORÍA Y APLICACIONES, 133-134

Electricidad		Conducción de calor	
Tensión	V	Temperatura	T
Intensidad	I	Flujo de calor	Q
Resistividad	ρ	Inversa de la conductividad técnica	$1/k$
Resistencia eléctrica	R	Resistencia térmica R_t	
 $I = \frac{V_1 - V_2}{R} ; V_1 > V_2$		 $Q = \frac{T_1 - T_2}{R_t} ; T_1 > T_2$	

Por lo tanto, la resistencia térmica por conducción para una pared cilíndrica es:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} \quad (2.31)$$

Por lo tanto se puede representar el esquema planteado en un circuito térmico:



Ampliando los límites de frontera, consideramos la transferencia de calor a través de una pared cilíndrica compuesta que separa dos fluidos en movimiento a diferente temperatura:

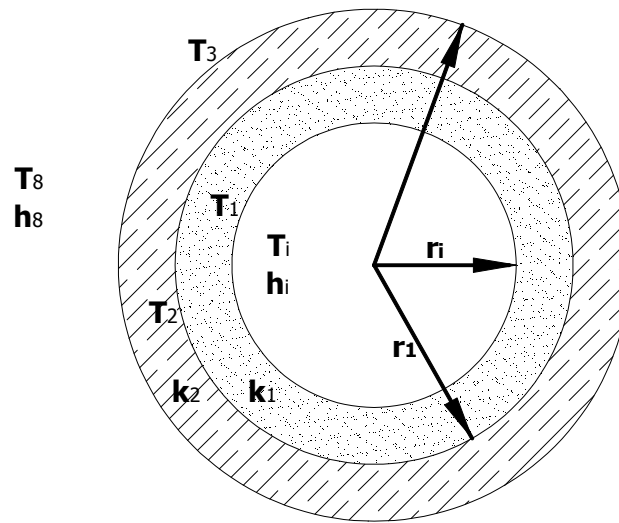
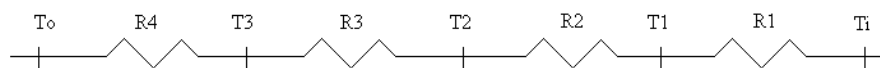


Figura 22. Resistencia en serie de un tubo cilíndrico aislado.

La analogía eléctrica lleva a establecer que una pared cilíndrica compuesta se comporta como un conjunto en serie de n resistencias internas, más dos resistencias superficiales.

El circuito térmico equivalente será:



$R_1 = \frac{1}{h_i * A_i}$ Resistencia térmica por convección desde fluido a T_i hasta superficie de la pared a T_1 . $A_i = 2\pi r_i L$

$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_i}\right)}{2\pi k_1 L}$ Resistencia térmica por conducción en la pared de espesor $r_1 - r_i$, desde T_1 a T_2 .

$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_1}\right)}{2\pi k_2 L}$ Resistencia térmica por conducción en la pared cilíndrica (aislante) de espesor $r_o - r_1$, desde T_2 a T_3 .

$R_4 = \frac{l}{h_o * A_o}$ Resistencia térmica por convección desde superficie de la pared a T_3 , hasta el fluido a T_o . $A_o = 2\pi r_o L$

2.5.3 TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN.

La transferencia de calor por convección aparece siempre que un cuerpo se coloca en un fluido con una temperatura mayor o menor. Debido a la diferencia de temperatura, el calor fluye entre el fluido y el cuerpo, cambiando la densidad del fluido cerca de la superficie. La diferencia de densidad produce un flujo descendente del fluido más pesado y un flujo ascendente del fluido más ligero.

Se distinguen dos tipos de convección:

- Se dice que la convección es natural cuando el movimiento del fluido es provocado por las diferencias en la densidad, debido a la diferencia de temperatura entre el fluido y la pared.
- La convección es forzada cuando el movimiento del fluido es provocado por una acción mecánica (bomba, ventilador, compresor, etc.).

En ambos casos la ecuación que predice la pérdida de calor, es la ecuación de Newton:

$$Q = h A (T_s - T_f) \quad (2.31)$$

Donde:

Q: Flujo de calor; [W]

- h: Coeficiente de transferencia de calor por convección natural o forzada; $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
- T_s : Temperatura en la superficie; $[^\circ C]$
- T_f : Temperatura del fluido; $[^\circ C]$
- A: Área de transferencia perpendicular a la dirección de flujo de calor; $[m]^2$

2.5.3.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección.³⁵

El coeficiente de transferencia de calor por convección “h” no es una propiedad, su magnitud depende de una variedad de factores, tales como la velocidad, conductividad térmica, densidad, viscosidad, calor específico del fluido, geometría de la superficie, presencia de fuerzas de flotamiento, etc.

Existen varios métodos para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor por convección:

1. Análisis dimensional combinado con experimentos.
2. Soluciones matemáticas exactas de las ecuaciones de capa de frontera.
3. Análisis aproximado de la capa frontera por métodos integrales.
4. Analogía entre transferencia de calor, transferencia de masa y transferencia de cantidad de movimiento.

³⁵ M. R. VALENZUELA: APUNTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR, 53

2.5.3.2 Números adimensionales.³⁶

En el análisis de la convección es práctica común quitar las dimensiones a las expresiones físico – matemáticas que modelan el mecanismo y agrupan las variables dando lugar a los números adimensionales. En convección se emplean los siguientes números adimensionales:

2.5.3.2.1 Número de Reynolds.

Representa la relación que existe entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre un elemento de volumen de un fluido. Es un indicativo del tipo de flujo de fluido, laminar o turbulento. El número de Reynolds solo se utiliza en convección forzada.

$$R_e = \frac{v^* \phi^* \rho}{\mu} \quad (2.32)$$

Donde:

v : Velocidad del fluido; $\left[\frac{m}{s}\right]$

ϕ : Diámetro; $[m]$

ρ : Densidad del fluido; $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

μ : Viscosidad dinámica; $\left[\frac{Pa}{s}\right]$

³⁶ PARISIENNE COMPAGNIE: VAPOR DE AGUA, TEORÍA Y APLICACIONES, 167 - 168

La experiencia muestra que el régimen depende del valor que asume la cantidad, llamada número de Reynolds.

- Si $R_e < 2000$ el régimen es laminar.
- Si $2000 < R_e < 10\,000$ el régimen es de transición.
- Si $R_e > 10\,000$ el régimen es turbulento.

2.5.3.2.2 Número de Nüsselt (o Número de Biot: B).

Representa la relación que existe entre el calor transferido por convección a través del fluido y el que se transfería si sólo existiese por conducción. Se considera una capa de fluido de espesor L con sus superficies a diferentes temperaturas T_1 y T_2 , $T_1 > T_2$, $\Delta T = T_1 - T_2$, como se muestra en la figura (23):

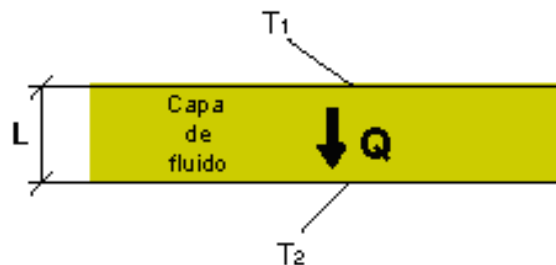


Figura 23. Fluido a diferentes temperaturas.

El flujo debido a la convección será: $Q_{conv} = h * \Delta T$, mientras que el flujo de calor si sólo existiera conducción sería: $Q_{cond} = k * (\Delta T / L)$. Dividiendo ambas expresiones:

$$\frac{Q_{conv}}{Q_{cond}} = \frac{h * \Delta T}{k * \left(\frac{\Delta T}{L} \right)} = \frac{h * L}{k}$$

$$N_{Nu} = \frac{h^* Lc}{k} \quad (2.33)$$

Donde:

h: Coeficiente de convección; $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

Lc: Longitud característica; $[m]$

k: Conductividad térmica del material; $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

Para un tubo circular: $N_{Nu} = \frac{h^* \phi}{k}$; donde ϕ es el diámetro interior del tubo; cuanto mayor es el número de Nüsselt más eficaz es la convección, el número de Nüsselt se emplea tanto en convección natural como forzada.

2.5.3.2.3 Número Prandtl.

$$N_{Pr} = \frac{Cp^* \mu}{k} \quad (2.34)$$

2.5.3.2.4 Número de Grashof.

Representa la relación que existe entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. Es un indicativo del régimen de flujo en convección natural, equivalente al número de Reynolds en convección forzada.

$$N_{Gr} = \frac{g^* \beta^* \Delta T^* Lc^3}{\nu^2} \quad (2.35)$$

Donde:

g : Es la aceleración de la gravedad; $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

β : Coeficiente de dilatación del fluido; $\left[\frac{1}{^\circ C} \right]$

ΔT : Es la diferencia de temperatura entre la pared y el fluido ($\Delta T = T' - T$); $[^\circ C]$

L_c : Longitud característica. Para una placa vertical de longitud L , $L_c = L$. Para un cilindro de diámetro ϕ , $L_c = \phi$; $[m]$

ν : Viscosidad cinemática; $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

El número de Grashof sólo se utiliza en convección natural.

2.5.3.3 Convección forzada.

La transferencia de calor por convección forzada es el modo que se utiliza con mayor frecuencia en las industrias de procesamiento. Se bombean fluidos calientes y fríos, separados por una frontera sólida, a través del equipo de transferencia de calor, con una rapidez de transferencia de calor que es función de las propiedades físicas de los fluidos y la forma geométrica del sistema.³⁷

Como los fenómenos de intercambio de calor por convección están ligados al movimiento del fluido, fácilmente se comprende que en el caso de la convección forzada, es conveniente diferenciar el régimen turbulento del régimen laminar.

³⁷ PERRY ROBERT & CHILTON CECIL: BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUÍMICO, 10-13

El cálculo de los coeficientes de convección se basa en las teorías de la mecánica de los fluidos. Los resultados teóricos obtenidos no siempre concuerdan con las mediciones experimentales; por tanto, las fórmulas que siguen son empíricas.

En la convección forzada, existe linealidad entre el flujo y la diferencia de temperatura; esto es: $h = c^{te}$

2.5.3.3.1 Régimen laminar.³⁸

Recuérdese que el régimen es laminar cuando $R_e < 2000$.

a) Gases.

Como los resultados experimentales son pocos, en general se utilizan las fórmulas teóricas siguientes:

- Si $x > 0.05 * \phi * R_e * N_{Pr}$ (siendo x la abscisa del punto considerado).

$$N_{Nu} = \frac{h * \phi}{k} = 3.66 \quad (2.36)$$

- Si $x < 0.05 * \phi * R_e * N_{Pr}$.

$$N_{Nu} = \frac{h * \phi}{k} = 1.06 \left(\frac{D}{x} * R_e * N_{Pr} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.37)$$

³⁸ PARISIENNE COMPAGNIE: VAPOR DE AGUA, TEORÍA Y APLICACIONES. 169-170.

b) Líquidos.

Los resultados experimentales concernientes a los líquidos son más numerosos. Se adaptan satisfactoriamente a la fórmula:

$$N_{Nu} = \frac{h^* \phi}{k} = 2.34 \left(\frac{D}{x} * R_e * N_{Pr} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.38)$$

2.5.3.3.2 Régimen turbulento.

El régimen es turbulento cuando $R_e > 10000$, este es el caso más frecuente.

a) Gases

Se utiliza la fórmula de Mc Adams:

$$N_{Nu} = \frac{h^* \phi}{k} = 0.02 R_e^{0.8} \quad (2.39)$$

Así como la fórmula de Ribaud que es más precisa:

$$N_{Nu} = \frac{h^* \phi}{k} = 0.023 (R_e * N_{Pr})^{0.8} \quad (2.40)$$

Dado que el número de Prandtl es cercano a 1, la fórmula (2.39) continúa siendo semejante a la fórmula 2.40.

b) Líquidos.

La fórmula de uso más común es:

$$N_{Nu} = \frac{h^* \phi}{k} = 0.00225 Re^{0.8} * N_{Pr}^{0.4} \quad (2.41)$$

2.5.3.4 Convección natural.³⁹

Se produce la convección natural cuando una superficie sólida está en contacto con un fluido de temperatura distinta a la de la superficie. Las diferencias de densidad proporcionan la fuerza del cuerpo que se requiere para desplazar el fluido. Teóricamente, los análisis de la convección natural requieren la resolución simultánea de las ecuaciones acopladas del movimiento y la energía.

La resolución de las ecuaciones del movimiento y la energía dan los campos de temperatura y velocidad a partir de los que se pueden deducir coeficientes de transferencia de calor. El tipo general de ecuación que se obtiene para el aire como para el agua es:

$$h_{\infty} = b(T)^m * L^{3m-1} \quad (2.42)$$

Donde:

h_{∞} : Coeficiente de transferencia de calor del aire; $\left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]$

b: Coeficiente de proporcionalidad.

³⁹ PERRY ROBERT & CHILTON CECIL: BIBLIOTECA DEL INGENIERO QUÍMICO, 10-12

- L: Longitud de la superficie de transferencia de calor; $[ft]$
- T: Temperatura al inicio de la prueba, temperatura ambiente; $[^{\circ}F]$
- m: Razón, término o exponente.

CAPÍTULO III

3 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL⁴⁰

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Además de su gran importancia en los sistemas de vehículos espaciales, de guiado de misiles, robóticas y análogos, el control automático se ha convertido en una parte importante e integral de los procesos modernos industriales y de fabricación. Por ejemplo, el control automático es esencial en el control numérico de las máquinas-herramientas de la industria de manufactura, en el diseño de sistemas de pilotos automáticos en la industria aeroespacial, y en el diseño de automóviles y camiones en la industria automotriz. También es esencial en las operaciones industriales como el control de presión, temperatura, humedad, viscosidad, y flujo en las industrias de proceso.

Como los avances en la teoría y la práctica del control automático proporcionan los medios para conseguir un comportamiento óptimo de los sistemas dinámicos, mejorar la productividad, simplificar el trabajo de muchas operaciones repetitivas y manuales, la mayoría de los ingenieros y científicos deben tener un buen conocimiento de este campo.

⁴⁰ KATSUHIKO OGATA: INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, 2

El gran avance actual en el control automático ha sido posible por los desarrollos de los semiconductores y de los computadores electrónicos. El empleo sucesivo de las válvulas electrónicas, los transistores y los circuitos integrados ha proporcionado equipo de control e instrumentos de medida que ofrecen precisión, fiabilidad y economía.

3.1 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.⁴¹

Los componentes básicos de todo sistema de control son:

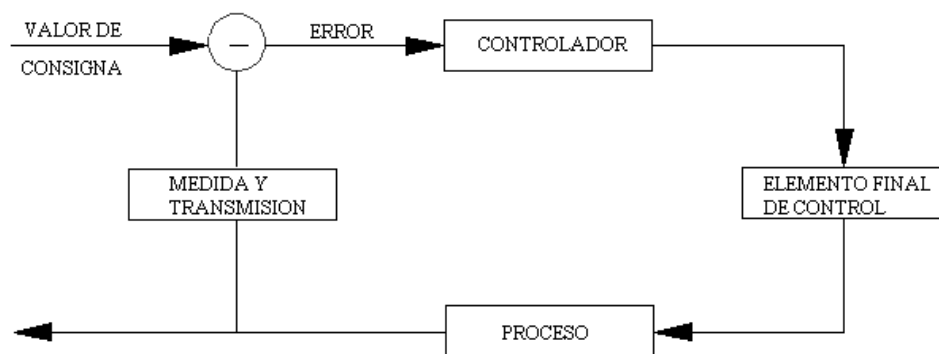


Figura 24. Diagrama de bloques⁴²

a) **Sensor**, que también se conoce como elemento primario que puede ser un termopar, dispositivo de resistencia térmica, termómetros, termistores, etc. Los sensores que se utilizaron en el proyecto fueron del tipo NTC (figura 25), que deben ser conectado en los bornes 3 y 4 del controlador digital.

⁴¹ SMITH-CORRIPIO: CONTROL AUTOMÁTICO DE PROCESOS, 19

⁴² CREUS SOLE ANTONIO: INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL, 466



Figura 25. Sensor NTC.

- b) Transmisor**, el cual se conoce como elemento secundario. El transmisor capta la señal y la transforma a una señal neumática, electrónica o digital para enviarla al controlador.
- c) Controlador**, que es el “cerebro” del sistema de control. El controlador permite al proceso cumplir su objetivo, y realiza dos funciones esenciales:

- Compara la variable medida con la de referencia o deseada para determinar el error.
- Estabiliza el funcionamiento dinámico del lazo o bucle de control mediante circuitos especiales (acciones de control, o modos de control, algoritmos de control) para reducir o eliminar el error.

En el caso del proyecto, se utilizaron dos controladores digitales: **C1** controla la temperatura del aceite (el sensor está ubicado dentro del viscosímetro) y **C2** controla la temperatura del baño maría, el Controlador C1 actúa sobre el Controlador C2 y dicho controlador a la vez actúa sobre las resistencias eléctricas (encendiendo o apagando) dependiendo del valor que el usuario setee a C1.



Figura 26. Controlador digital MT – 543Ri plus.

Descripción de los controladores: El **MT – 543Ri plus** (figura 26) posee 3 salidas de control de temperatura más un buzzer interno. Como posee gran versatilidad, permite que la segunda etapa actúe como alarma y la tercera, además de funcionar como timer cíclico, puede actuar en conjunto con la primera en sistemas que necesiten ventilación. En el siguiente cuadro se detallan las especificaciones técnicas de los controladores.

Tabla XI. Datos técnicos de los controladores.

Especificaciones Técnicas
Alimentación: MT-543Ri plus - 115/230 Vac \pm 10% (50/60 Hz) MT-543Ri plus -12/24 Vac /dc
Temperatura de control: NTC: -50 hasta 105 °C (\pm 0.1°C)

El esquema de conexión de los controladores digitales se detalla en la siguiente figura:

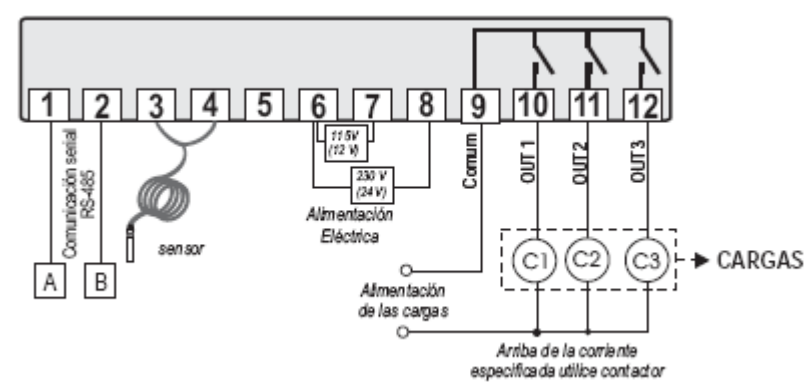


Figura 27. Esquema de conexión.

d) **Elemento final de control**, frecuentemente se trata de una válvula de control aunque no siempre. Otros electos finales de control comúnmente utilizados son las bombas de velocidad variable, motores eléctricos.

La importancia de estos componentes básicos ya que realizan las tres operaciones básicas que deben estar presentes en todo sistema de control; estas operaciones son:

1. **Medición (M)**: la medición de la variable que se controla se hace generalmente mediante la combinación de sensor y transmisor.
2. **Decisión (D)**: con base en la medición, el controlador decide qué hacer para mantener la variable en el valor que se desea.
3. **Acción (A)**: como resultado de la decisión del controlador se debe efectuar una acción en el sistema, generalmente ésta es realizada por el elemento final de control.

3.2 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO.

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada (fig. 28).

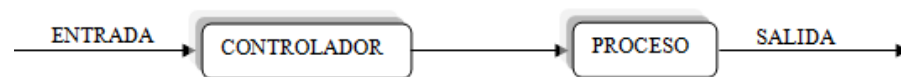


Figura 28. Sistema de control en lazo abierto.

En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea

deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones externas ni internas.

3.3 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO.

Se dice que un sistema de control de lazo cerrado es aquel en que la señal de salida tiene efecto sobre la acción del control. Esto es, los sistemas de control de lazo cerrado son sistemas de control realimentados como se indica a continuación.

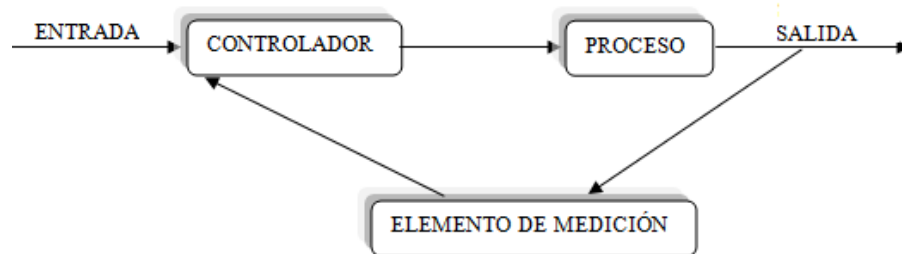


Figura 29. Diagrama de control en lazo cerrado.

3.3.1 Elementos básicos de un sistema de lazo cerrado.⁴³

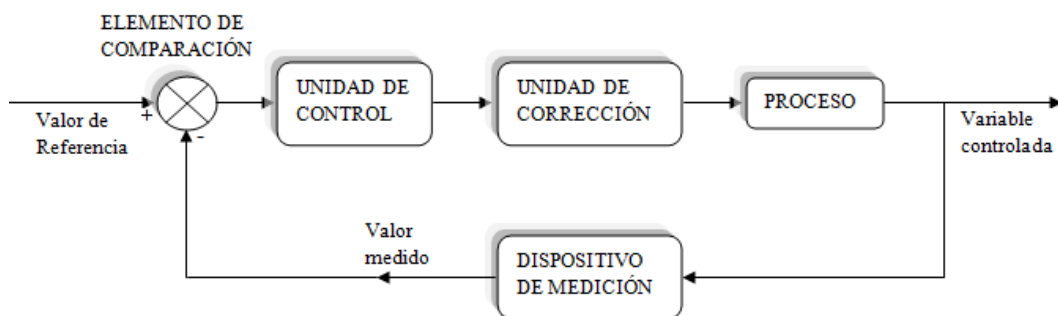


Figura 30. Elementos básicos de un sistema de control en lazo cerrado

⁴³ W. BOLTON: SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, 6-7.

En la figura 30 se muestra la configuración general de un sistema básico en lazo cerrado. Consta de los siguientes elementos:

1. Elemento de comparación.

Compara el valor deseado o de referencia de la condición variable que se controla con el valor medido de lo que se produce y genera una señal de error. Se le puede considerar como un sumador que añade la señal de referencia, positiva, a la señal del valor medido, que en este caso es negativa:

$$\begin{aligned} \text{Señal de error} &= \text{señal del valor de referencia} \\ &\quad - \text{señal del valor medido} \end{aligned}$$

En general, el símbolo utilizado para representar un elemento en el que se suman las señales es un círculo dividido; cada entrada va a un segmento. Un ciclo cerrado es el medio por el cual una señal relacionada con la condición real producida se retroalimenta para modificar la señal de entrada de un proceso.

2. Elemento de control.

En cuanto recibe una señal de error, el elemento de control decide qué acción llevar a cabo. Por ejemplo en la tesis, dependiendo del valor que el usuario setee al C1, este le envía una señal al C2; y dependiendo del valor deseado éste actúa sobre las resistencias eléctricas encendiéndolas o apagándolas, de acuerdo de la magnitud de error.

3. Elemento de corrección.

El elemento de corrección produce un cambio en el proceso a fin de corregir o modificar la condición controlada. Puede ser un interruptor que enciende un calentador para aumentar la temperatura de un proceso, o una válvula que al abrirse permite la entrada de un mayor volumen de líquido al proceso.

4. Elemento de proceso.

El proceso es aquello que se está controlando. En el caso del Viscosímetro Saybolt Universal se debe tener un control de temperatura para poder obtener datos no erróneos en la medición de la viscosidad

5. Elemento de medición.

El elemento de medición produce una señal relacionada con el estado de la variable del proceso que se controla.

3.4 SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA.⁴⁴

Una de las técnicas para mejorar la estabilidad de un circuito complejo es el empleo de control en cascada. Se utiliza cuando la variable controlada no puede mantenerse dentro del punto de consigna, por óptimos que sean los ajustes del controlador, debido a las perturbaciones que se producen en alguna condición del proceso.

La estrategia consiste en implantar un lazo de control secundario (anidado) dentro del lazo principal, efectos de controlar, de manera independiente, la propia variable

⁴⁴ CREUS SOLE ANTONIO: INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL, 331-332

manipulada. Éste tipo de control se utilizó, para controlar la temperatura del proyecto, para lo cual se utilizaron dos controladores que nos permitió tener un control estricto del mismo.

Su principio de funcionamiento es controlar rápidamente las variables intermedias corrigiendo el efecto de las perturbaciones de entrada antes de que estas afecten a la salida del proceso.

El objetivo del Control en Cascada es mejorar la estabilidad de una variable del proceso aun con una optima sintonización del controlador en lazo retroalimentado. La configuración de Control en cascada se utiliza cuando la variable manipulada sufre importantes perturbaciones que afectan en exceso a la variable controlada.

La aplicación de ésta técnica de control, es conveniente cuando la variable no puede mantenerse dentro del valor de set point deseado, debido a las perturbaciones inherentes al proceso.

Para que un sistema de Control en Cascada esté bien aplicada es necesario que se tomen en cuenta algunos aspectos importantes para su aplicación, éstos son:

- Localizar las variables más importantes del proceso.
- Localizar la variable básica a controlar.
- Localizar la variable que introduce la inestabilidad.
- Determinar la velocidad de cambio de ambas señales.
- Hacer un arreglo en cascada, de tal forma que el lazo mayor sea más lento y el controlador también (control maestro).
- El lazo menor deberá contener la variable más rápida y el controlador debe ser de respuesta con retardos mínimos (control esclavo).
- El controlador del lazo menor deberá sintonizarse con la ganancia más alta posible.

- El controlador esclavo se selecciona con set point remoto, mientras que el controlador maestro es de tipo local.

Naturalmente que estas recomendaciones son, basándose en la experiencia que se tiene sobre la dinámica del proceso, sobre el controlador y algo de sentido común.

El control en cascada se usa comúnmente en los siguientes procesos:

- Cuando se instala un posicionador para manejar una válvula y el interés primordial es controlar el gasto en una tubería.
- Cuando el lazo secundario es el control de flujo, cuyo punto de operación está fijado por el controlador primario (de temperatura por ejemplo).
- Cuando el lazo secundario es el control de temperatura y el punto de operación lo fija un controlador primario (también de temperatura o de composición química), como en el caso de intercambiadores de calor o reactores químicos.
- Cuando existen varias unidades en paralelo que alimentan a un proceso, y sucede que la carga se reparte más o menos igualmente entre dichas unidades y se desea que el operador pueda variar manualmente alguna de ellas o inclusive sacarla de operación; se desea que el controlador secundario redistribuya la carga entre las demás unidades, de tal manera que la variable de interés se mantenga regulada.

3.5 CONTROL DE TEMPERATURA EN CASCADA.

En el caso de la tesis se debe controlar estrictamente la temperatura mediante los dos controladores (cerebros del sistema) mediante el sistema de control en cascada. Estos dos controladores o instrumentos deben estar conectados en serie (figura 31).

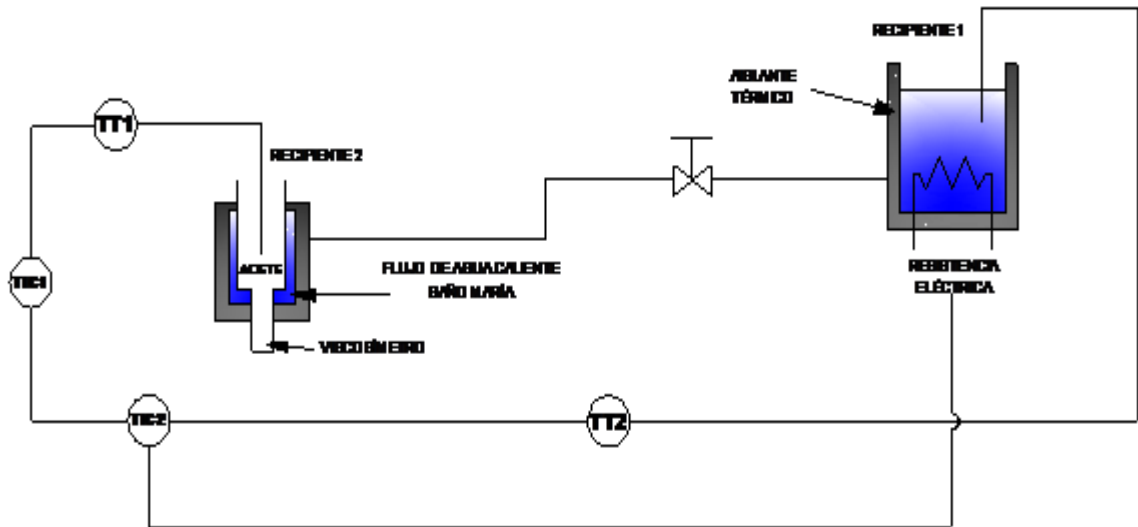


Figura 31. Sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt Universal.

El controlador indicador de temperatura TIC 1 (primario C1), cuyo sensor de temperatura o transmisor de temperatura (TT1) está ubicado dentro del viscosímetro el cual contiene aceite a ensayar; y el TIC 2 (controlador secundario C2), cuyo sensor está ubicado en el recipiente 1 (flujo de agua caliente “baño maría”).

Si la señal de salida del controlador de temperatura C1 actúa como punto de consigna del otro controlador C2 este a su vez controla la temperatura del fluido (agua) del recipiente 1 y cuya señal de salida actúa sobre las resistencias eléctricas encendiéndolas o apagándolas, éste segundo controlador (secundario) permite corregir rápidamente la temperatura en el recipiente 1 provocadas por perturbaciones, manteniendo el sistema en todo momento en la capacidad para controlar la temperatura con el instrumento primario (TIC 1). Éstos dos instrumentos (controladores) conectados en serie actúan manteniendo la temperatura constante, esta disposición se denomina control en cascada.

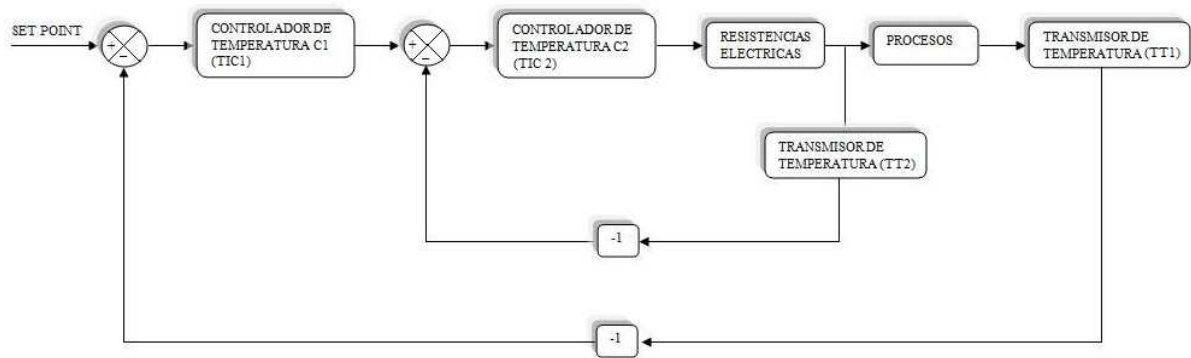


Figura 32. Diagramas de bloques del sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt Universal.

3.5.1 Ventajas del control en cascada

- Las perturbaciones en el lazo interno o secundario son corregidas por el controlador secundario, antes de que ellas puedan afectar la variable primaria.
- Cualquier variación en la ganancia estática de la parte secundaria del proceso es compensada por su propio lazo.
- Las constantes de tiempo asociadas al proceso secundario son reducidas drásticamente por el lazo secundario.
- El controlador primario recibe ayuda del controlador secundario para lograr una gran reducción en la variación de la variable primaria.
- Una configuración en cascada mejora la controlabilidad del lazo, de tal manera que las desviaciones causadas por una perturbación de este tipo son menores que si se trataran de un lazo sencillo.

3.5.2 MODELOS MATEMÁTICOS.

Para estudiar el comportamiento de los sistemas se utilizan modelos matemáticos, que se representan por ecuaciones, las cuales describen las relaciones entre la entrada y la

salida de un sistema, y que también se aprovechan para predecir el comportamiento de un sistema.

3.5.2.1 Sistemas térmicos.⁴⁵

Los procesos térmicos básicos son las mezclas de fluidos fríos y calientes, intercambio de calor entre cuerpos contiguos, generación de calor por combustión, reacciones químicas o desintegración atómica e inducción de calor por agitación molecular o atómica.

Los elementos básicos de estos sistemas son dos: resistencia y capacitancia térmica.

Existe un flujo neto de calor entre dos puntos si entre ellos hay una diferencia de temperatura.

El equivalente eléctrico de lo anterior es que sólo existe una corriente neta es que sólo existe una corriente neta i , entre dos puntos cuando exista una diferencia de potencial, v , entre ellos; la relación entre la corriente y diferencia de potencial es $i = v/R$, donde R es la resistencia eléctrica entre ambos puntos. Con una relación similar se define a la resistencia térmica, R . Si q es la velocidad de flujo calorífico y $(T_1 - T_2)$ la diferencia de temperaturas, entonces:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R} \quad (3.1)$$

El valor de la resistencia depende del modo de la transferencia calorífica. En una conducción a través de un sólido, y suponiendo una conducción unidireccional:

$$q = A * K * \left(\frac{T_2 - T_1}{L} \right) \quad (3.2)$$

⁴⁵ W. BOLTON: SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, 205-207.

Donde A es el área de la sección transversal del material a través del cual se conduce calor, L la longitud del material entre los puntos correspondientes a la temperaturas T_1 y T_2 , K la conductividad térmica. Por lo tanto, con este modo de transferencia de calor, se obtiene:

$$R = \frac{L}{A * K} \quad (3.3)$$

Cuando el modo de transferencia de calor es por convección, como con líquidos y gases, entonces:

$$q = A * h * (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

Donde A es el área de la superficie donde hay diferencia de temperatura y h el coeficiente de transferencia calorífica. Por lo tanto, con este modo de transferencia de calor, se obtiene:

$$R = \frac{1}{A * h} \quad (3.5)$$

La capacitancia térmica es la medida de almacenamiento de energía interna en un sistema. Por consiguiente, si la velocidad del flujo de calor en un sistema es q_1 , y la velocidad del flujo de salida q_2 , entonces:

$$\text{Relación de cambio de la energía interna} = q_1 - q_2$$

Un aumento de la energía interna implica un incremento de la temperatura. Por lo tanto:

$$\text{Cambio de la energía interna} = m * C_p * \text{cambio de temperatura.}$$

Donde m es la masa y C_p el calor específico del material. Por lo tanto:

$$q_1 - q_2 = m * C_p \frac{dT}{dt} \quad (3.6)$$

En donde dT/dt es la tasa de cambio de la temperatura. Esta ecuación se puede escribir como:

$$q_1 - q_2 = C \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad (3.7)$$

C es la capacitancia térmica descrita como $C = mC_p$. La tabla XII resume los elementos básicos térmicos.

Tabla XII. Elementos básicos térmicos.

Elemento básico	Ecuación que lo describe
Capacitancia	$q_1 - q_2 = C \left(\frac{dT}{dt} \right)$
Resistencia	$q = \frac{T_2 - T_1}{R}$

3.5.2.2 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.

Para la realización del modelo matemático del sistema del Viscosímetro Saybolt Universal se utilizó el programa MATLAB V7, para observar el tiempo de estabilización del equipo, tanto con el aceite SAE 15W40 y SAE 10W30.

En la siguiente tabla se ilustra datos de temperatura que da el controlador 1 en función del tiempo.

Tabla XIII. Valores instantáneos de temperatura en función del tiempo, del aceite grado SAE 15W40.

T(°C)	t (s)
25,4	0
26	30
26,4	60
26,7	90
27,1	120
27,4	150
27,7	180
27,9	210
28,2	240
28,5	270
29,1	300
29,7	330
30,6	360
32,3	390
34,4	420
36,4	450
38	480
39,2	510
41,2	540
42	570
42,6	600
43,3	630
44,3	660
45,5	690
46,7	720
47,9	750
48,7	780
49,2	810
49,5	840
49,4	870
49,1	900
48,8	930
48,4	960
47,9	990
47,6	1020
47,2	1050
46,9	1080
46,6	1110
46,3	1140
46,1	1170

Función de transferencia conseguido mediante MATLAB:

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_p s} * \exp(-T_d * s)$$

$$\text{Donde : } K = 0.06569$$

$$T_p = 1.3324$$

$$T_d = 145.98$$

$$G(s) = \frac{0.06569}{1 + 1.3324s} * \exp(-145.98 * s)$$

Gráfica de la estabilización de la temperatura en función del tiempo.

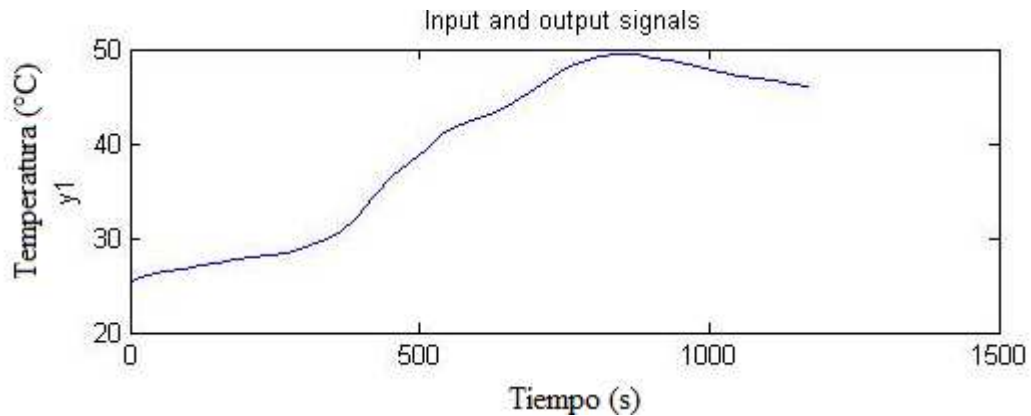


Figura 33. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 15W40).

Como se puede observar la gráfica a 40°C le corresponde un valor aproximado de 500s lo que coincide con los datos empíricos mostrados en la Tabla XIII.

Con el proceso anterior realizamos el cálculo de la función de transferencia del aceite grado SAE 10W30, de donde se obtiene lo siguiente:

Tabla XIV. Valores instantáneos de temperatura en función del tiempo, del aceite grado SAE 10W30.

T(°C)	t (s)
19	0
19,5	30
19,5	60
,5	90

19,5	120
19,5	150
19,5	180
19,6	210
19,6	240
19,6	270
19,6	300
19,6	330
19,6	360
19,6	390
19,6	420
19,6	450
19,6	480
19,7	510
19,7	540
19,8	570
19,8	600
19,9	630
20	660
20,2	690
20,4	720
20,7	750
21,1	780
21,5	810
21,9	840
22,5	870
23	900
23,5	930
24	960
24,6	990
25,2	1020
25,7	1050
26,3	1080
27	1110
28	1140
29,4	1170
31,2	1200
32,7	1230
33,8	1260
34,6	1290
36,1	1320
38,2	1350

40	1380
43,4	1410
47	1440
50	1470
52,6	1500
54,5	1530
55,2	1560
54,8	1590
54,1	1620
53,2	1650
52,6	1680
52	1710
51,5	1740
50,8	1770
50,3	1800
49,8	1830
49,4	1860
48,9	1890

Función de transferencia conseguido mediante MATLAB.

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_p I * s} \exp(-Td * s)$$

$$\text{Donde: } K = 0.052206$$

$$T_p I = 935.98$$

$$Td = 15.625$$

$$G(s) = \frac{0.052206}{1 + 935.98s} * \exp(-15.625 * s)$$

Gráfica de la estabilización de la temperatura en función del tiempo.

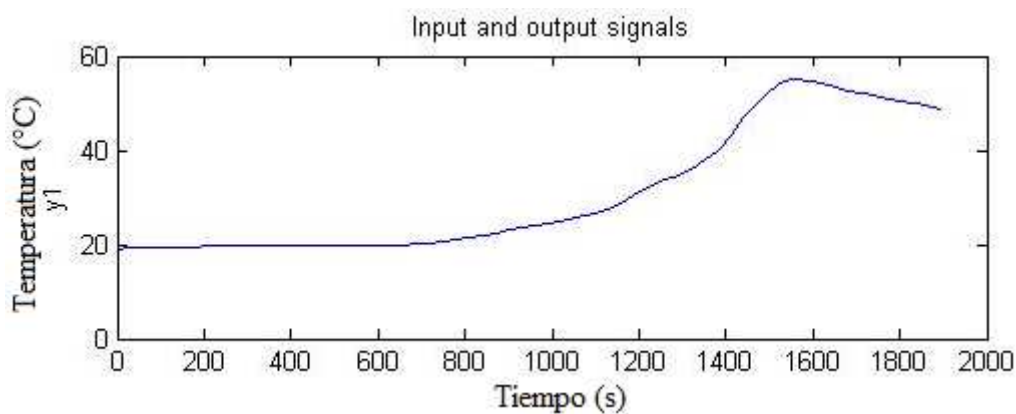


Figura 34. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 10W30).

CAPÍTULO IV

4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.

El propósito del equipo a diseñarse en cuanto a su aplicación y condiciones de trabajo, deben tomarse en cuenta los siguientes factores que definen el diseño de la misma, así tenemos: seguridad, desgaste, costo, forma, tamaño rigidez, control de la temperatura, fácil

manipulación para el usuario y mantenimiento, de esta manera se podrá obtener finalmente los resultados acorde a la necesidad que presenta el usuario.

4.1 ALTERNATIVAS DEL DISEÑO DEL VISCOSÍMETRO.

4.1.1 Selección del material de construcción de los recipientes.

Es de vital importancia el material con que se va a construir los recipientes, para ello se tiene las siguientes alternativas:

- Acero.
- Acero inoxidable
- Aluminio.

ACERO.

El **acero** es la aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar a diferencia de los aceros, se moldean.

Características.

- **Alta resistencia mecánica:** Los aceros son materiales con alta resistencia mecánica al someterlos a esfuerzos de tracción y compresión y lo soportan por la contribución química que tienen los aceros. Por medio de los ensayos de laboratorio se determina la resistencia a tracción y a compresión evaluando su límite elástico y el esfuerzo de rotura.

- **Elasticidad:** La elasticidad de los aceros es muy alta, en un ensayo de tracción del acero al estirarse antes de llegar a su límite elástico vuelve a su condición original.
- **Soldabilidad:** Es un material que se puede unir por medio de soldadura y gracias a esto se pueden componer una serie de estructuras con piezas rectas.
- **Ductilidad:** Los aceros tienen una alta capacidad para trabajarlos, doblarlos y torcerlos.
- **Forjabilidad:** Significa que al calentarse y al darle martillazos se les puede dar cualquier forma deseada.
- **Trabajabilidad:** se pueden cortar y perforar a pesar de que es muy resistente y aún así sigue manteniendo su eficacia.
- **Oxidación:** Los aceros tienen una alta capacidad de oxidarse si se exponen al aire y al agua simultáneamente y se puede producir corrosión del material si se trata de agua salina.
- **Transmisor de calor y electricidad:** El acero es un alto transmisor de corriente y a su vez se debilita mucho a altas temperaturas, por lo que es preferible utilizar aceros al níquel o al aluminio o tratar de protegerlos haciendo ventilados y evitar hacer fábricas de combustible o plásticos con este tipo de material.

ACERO INOXIDABLE.

Como todos los tipos de aceros, el acero inoxidable no es un material simple sino una aleación. Lo que tienen en común todos los aceros es que el principal componente (elemento que forma la aleación) es el hierro, al que se añade una pequeña cantidad de carbono. El acero inoxidable fue inventado a principios del siglo XX cuando se descubrió que una pequeña cantidad de cromo (habitualmente un mínimo de 11%) añadido al acero común, le daba un

aspecto brillante y lo hacía altamente resistente a la suciedad y a la oxidación. Esta resistencia a la oxidación, denominada “resistencia a la corrosión”, es lo que hace al acero inoxidable diferente de otros tipos de acero.

Su resistencia a la corrosión es lo que da al acero inoxidable su nombre. Sin embargo, justo después de su descubrimiento se apreció que el material tenía otras muchas valiosas propiedades que lo hacen idóneo para una amplia gama de usos diversos. Las posibles aplicaciones del acero inoxidable son casi ilimitadas, hecho que puede comprobarse con tan solo unos ejemplos:

- **En el hogar:** cubertería y menaje, fregaderos, sartenes y baterías de cocina, hornos y barbacoas, equipamiento de jardín y mobiliario.
- **En la ciudad:** paradas de autobús, cabinas telefónicas y resto de mobiliario urbano, fachadas de edificios, ascensores y escaleras, vagones de metro e infraestructuras de las estaciones.
- **En la industria:** equipamiento para la fabricación de productos alimentarios y farmacéuticos, plantas para el tratamiento de aguas potables y residuales, plantas químicas y petroquímicas, componentes para la automoción y aeronáutica, depósitos de combustible y productos químicos.

Características.

- **Costo-Beneficio:** Bajo costo de mantenimiento y una excelente relación costo-beneficio.
- **Conformación:** Gran capacidad de la flexibilidad, de fácil moldeado, facilidad de la unión, la sencillez de los trabajos en los procesos de soldadura, estampado, plegado, curvado, corte, etc.

- **Durabilidad:** Largo ciclo de vida. Todo lo que es hecho en acero inoxidable se hace para resistir mucho tiempo.
- **Higiene y Limpieza:** Facilidad de limpieza y conservación, permitiendo total higiene y la garantía de la calidad en la asepsia. Al ser un material inerte que no tiene sabor, es sin olor y no desprende metales.
- **Estética:** Fuerte apelo visual (belleza y modernidad).
- **Resistencia:** Alta resistencia a la corrosión, alta resistencia a altas temperaturas. Mantiene sus propiedades, incluso cuando se somete a altas y bajas temperaturas (criogénicos).
- **Conformidad Ambiental:** Reciclaje no afecta en la calidad, que contribuye a preservar el medio ambiente, por lo tanto, es 100% reciclable.

ALUMINIO.

Se trata de un metal no ferroso. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX² el metal que más se utiliza después del acero.

Características.

- **Ligereza:** El aluminio tiene un peso muy reducido: pesa solamente un tercio que el acero con el mismo volumen, permitiendo, de esta manera, obtener importantes ahorros de peso en casi todos los tipos de **aplicaciones**, sobre todo, la mecánica.
- **Duración:** El aluminio, gracias a la capacidad de desarrollar una película en la que no puede penetrar el óxido en las superficies expuestas, no está sometido a problemas de corrosión atmosférica, habituales en el hierro y el cobre, y no requiere ningún tipo de pintura de protección. Por este motivo, está especialmente indicado para aplicaciones arquitectónicas y navales, así como la fabricación de **cerramientos** y fachadas continuas.
- **Conductividad:** El aluminio tiene una extraordinaria conductividad eléctrica que lo hace indispensable para la electrónica y las aplicaciones eléctricas. Permite realizar líneas de gran longitud con cables de aluminio capaces de conducir la corriente eléctrica en cantidad doble que las de cobre del mismo peso. De hecho, se presta también a aplicaciones de calefacción y refrigeración.
- **No tóxico:** Es un material atóxico, muy utilizado para conservar alimentos y bebidas.
- **Maleabilidad:** El aluminio es muy maleable y puede modelarse, con todas las técnicas habituales de **tratamiento**, con más facilidad que la mayoría de otros metales. Se puede forjar, laminar hasta obtener una hoja muy fina, extrusar en **perfiles** complejos o plegar.
- **Versatilidad:** La posibilidad de utilizar el metal en aleaciones, que pueden ser rígidas o elásticas, especialmente sólidas y resistentes a la corrosión, permite adaptar el aluminio a una amplia gama de necesidades.
- **Reciclabilidad:** El aluminio se recicla con gran facilidad y con un coste energético reducido: actualmente, una cuarta parte de las necesidades de aluminio en Europa se abastece utilizando metal de segunda fusión que, a su vez, puede reciclarse indefinidamente.

4.1.2 Selección del material de construcción del viscosímetro.

Para la construcción del viscosímetro se tiene dos alternativas que son acero inoxidable y el cobre los cuales son los que nos dan los fabricantes para su construcción. Para la primera alternativa que es el acero inoxidable las características ya se describieron anteriormente.

COBRE.

Se trata de un metal de transición de color rojizo y brillo metálico que, junto con la plata y el oro, forma parte de la llamada familia del cobre, caracterizada por ser los mejores conductores de electricidad. Gracias a su alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, se ha convertido en el material más utilizado para fabricar cables eléctricos y otros componentes eléctricos y electrónicos.

Características.

- Es de fácil mecanizado.
- Permite tratamiento térmico. Temple y recocido.
- Elevado costo en el mercado.
- Material abundante en la naturaleza.
- Muy maleable, permite la producción de láminas muy delgadas.
- Muy dúctil, permite la fabricación de cables eléctricos muy finos.

4.1.3 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

Después de haber analizado las diferentes alternativas sobre el tipo de material que se puede utilizar para la construcción de los recipientes y el viscosímetro, se concluye que la

opción más viable para la realización del presente proyecto, es construir los recipientes y el viscosímetro en acero inoxidable debido a lo siguiente:

- Alta resistencia a la corrosión a altas temperaturas.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Largo ciclo de vida, ya que el acero inoxidable resiste mucho tiempo.
- Se encuentra fácilmente en el mercado.

4.2 NORMAS DE DIMENSIONAMIENTO.

Este método de prueba estándar para calcular la viscosidad de los aceites derivados del petróleo mediante el Viscosímetro Saybolt Universal esta bajo la norma **ASTM D 88-81**, lo cual se dimensionó el equipo de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma. Las dimensiones tanto del recipiente como del viscosímetro para su construcción se muestran en la figura 35 y figura 36. El recipiente se lo obtuvo mediante la compra a un distribuidor.

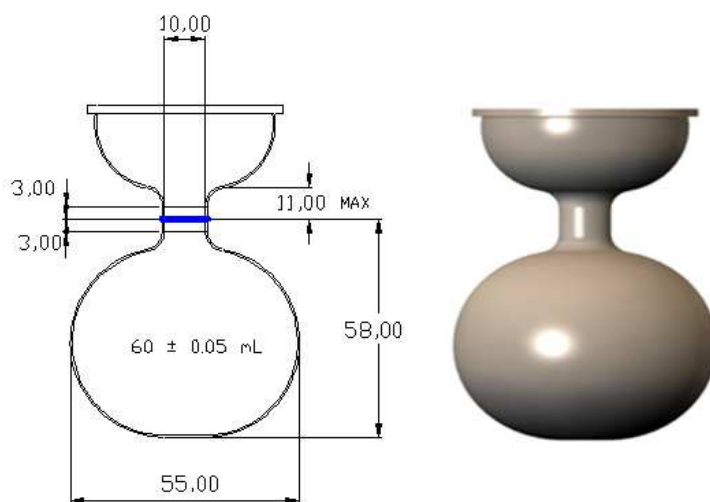


Figura 35. Frasco donde se recibe la muestra de aceite (dimensiones en mm).

4.2.2 Definiciones.

Viscosidad Saybolt Universal.- El tiempo correcto en segundos para dejar fluir 60 ml a través de un orificio Universal calibrado en condiciones específicas. Los valores de la viscosidad se dan en Segundos Saybolt Universal, abreviado SSU, a temperaturas específicas.

4.2.3 Resumen del método de prueba.

El tiempo en segundos para dejar fluir 60 ml de muestra a través de un orificio Universal calibrado, se mide bajo condiciones cuidadosamente controladas.

4.2.4 Preparación del equipo.

- Limpiar el viscosímetro y secarlo bien antes de iniciar la prueba. Un mondadientes (palillo) de madera puede ser útil en la limpieza del orificio.
- Coloque el frasco de recepción (figura 35) debajo del viscosímetro de modo que la señal de graduación sea a partir de 100 a 130 mm debajo del fondo del tubo del viscosímetro y de modo que la corriente del líquido caiga libremente en el frasco de medida.
- Instale o establezca el viscosímetro en un área donde no serán expuestas a los cambios rápidos de temperatura del aire, y el polvo o los vapores que podrían contaminar la muestra.
- Cambie el fluido del baño maría periódicamente y limpie las paredes exteriores del viscosímetro.

4.2.5 Procedimiento.

- Establezca y controle la temperatura del baño de acuerdo con la temperatura de prueba seleccionada.

- La temperatura estándar de prueba para medir viscosidades Saybolt Universal son 21.1, 37.8, 54.4 y 98.9°C (77, 100, 122 y 210°F).
- Insertar un tapón de corcho, en el fondo del viscosímetro. El corcho deberá firmemente insertarse en el fondo del viscosímetro para prevenir el escape del aire, y del aceite. Cuando se llega a la temperatura seleccionada de prueba retirar el mismo.
- Mover la muestra continuamente en el viscosímetro con el agitador, usando un movimiento circular de 30 a 50 revoluciones por minuto (r.p.m.). Tenga cuidado en no golpear el orificio.
- Comprobar para estar seguro que el frasco de recepción está en la posición apropiada; entonces retirar a presión el corcho del viscosímetro, y comenzar el contador de tiempo en el mismo instante
- Parar el tiempo en el instante que la muestra alcanza la señal de graduación sobre el frasco de recepción como se ilustra en la figura 39. La línea azul de la figura 35 es la señal de graduación, hasta donde se debe llegar el llenado de dicho frasco.
- Reemplazar el tiempo que se tomo que la muestra alcanza la señal de graduación en la ecuación 2.19.
-

4.2.6 **Tipo de fluido recomendado para el baño maría.**

Se debe equipar el baño maría con un aislamiento eficaz y con un eficiente dispositivo de revolvimiento. Para este tipo de viscosímetro que se construyó, la norma ASTM se refiere que puede utilizarse dos tipos de fluidos para realizar el baño, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XV. Baño recomendado

Temperatura estándar de prueba (°C)	Baño maría recomendado
21.1	agua

25	agua
37.8	agua o aceite térmico para 50 hasta 70 SUS
50	agua o aceite térmico para 120 hasta 150 SUS
54.4	agua o aceite térmico para 120 hasta 150 SUS
60	agua o aceite térmico para 120 hasta 150 SUS
82.2	agua o aceite térmico para 300 hasta 370 SUS
98.9	aceite térmico

4.3 DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA.

Entre los lubricantes más empleados en nuestro país, el de más alta viscosidad es el SYNTEMP 2000 cuyas características se presentan en la Tabla IX. Este va a ser nuestro tipo de aceite (patrón) para realizar los cálculos respectivos; se tomo este tipo de aceite porque es uno de los aceites que presentan mayor viscosidad en el mercado.

4.3.1 Análisis térmico del fuel oil (aceite) respecto al fluido caliente (baño maría).

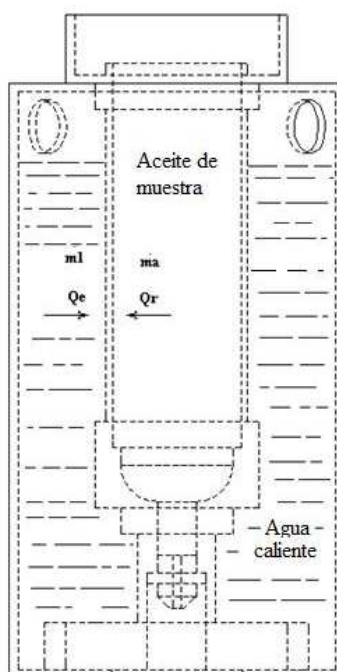


Figura 37. Transferencia de calor entre el aceite y el baño maría.

Se analizará el calor entregado por el agua y el calor que va a recibir el aceite (figura 37); por lo tanto existe un intercambio de calor entre el fluido de agua caliente y el aceite.

Balance de energía:

Calor entregado (fluido caliente) = Calor recibido (por el aceite)

$$Q_e = Q_r$$

$$m_1 C_{p_1} * \Delta T_1 = m_a * C_{p_a} * \Delta T$$

$$Q_2 = m_a * C_{p_a} * \Delta T$$

4.3.2 Análisis del aceite.

Todas las propiedades tales como densidad, peso específico, viscosidad, etc., se debe evaluar a una temperatura promedio.

$$T_{PROM} = \frac{T_f + T_o}{2} = \frac{(90 + 15) ^\circ C}{2} = 52.5 ^\circ C \quad (4.1)$$

Donde:

T_o : Temperatura ambiente en la ciudad de Riobamba ($T_o = 15^\circ C$).

T_f : Temperatura final a la cual va a ser evaluado la viscosidad del aceite, ($T_f = 90^\circ C$).

Se tomo este valor ($T_f = 90^\circ C$) porque el agua o fluido no cambia de estado; es decir que no hay un cambio de fase de líquido a vapor, por lo tanto se está trabajando en calor sensible.

➤ Cálculo del volumen del Viscosímetro Saybolt Universal.

Se calcula el volumen del viscosímetro hasta donde debe llenarse con aceite para realizar las pruebas. Las medidas que están especificadas en la figura 39, indican que ese va a ser el nivel de llenado con aceite.



Figura 38. Esquema general del Viscosímetro Saybolt.

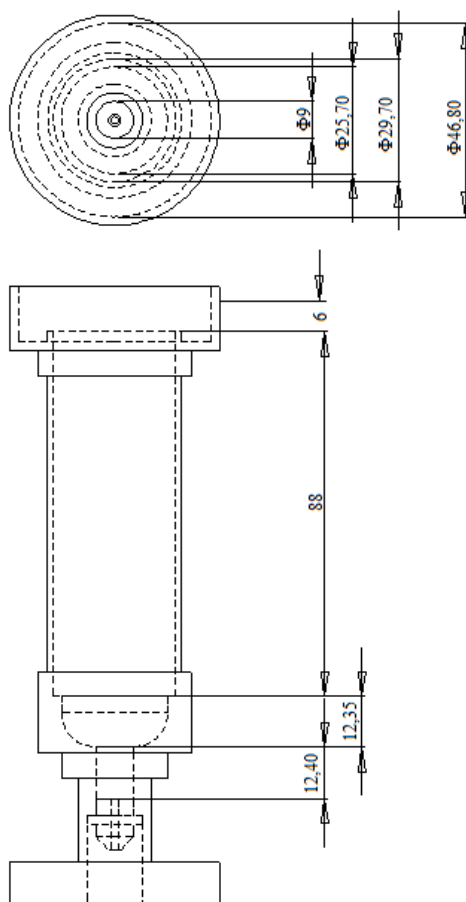


Figura 39. Medidas del Viscosímetro Saybolt (milímetros).

Los datos que se obtienen a partir de la figura 42 son: $\varnothing_1 = 46.8 \text{ mm}$; $H_1 = 6\text{mm}$; $\varnothing_2 = 29.7 \text{ mm}$; $H_2 = 88\text{mm}$; $\varnothing_3 = 25.7 \text{ mm}$; $H_3 = 12.35\text{mm}$; $\varnothing_4 = 9\text{mm}$; $H_4 = 12.4\text{mm}$.

La altura total de llenado del viscosímetro:

$$H_T = 6 + 88 + 12.53 + 12.40 = 118.75\text{mm}$$

Para encontrar el volumen del viscosímetro se aplica la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi * \phi^2 * H}{4} \quad (4.2)$$

$$V_1 = \frac{\pi * \phi_1^2 * H_1}{4}$$

$$V_1 = \frac{\pi * (46.8mm)^2 * 6mm}{4}$$

$$V_1 = 10\,321.263mm^3 = 1.032E-5m^3$$

$$V_2 = \frac{\pi * (\phi_2)^2 * H_2}{4}$$

$$V_2 = \frac{\pi * (29.7mm)^2 * 88mm}{4}$$

$$V_2 = 60\,965.684mm^3 = 6.097E-5m^3$$

$$V_3 = \frac{\pi * (\phi_3)^2 * H_3}{4}$$

$$V_3 = \frac{\pi * (25.7mm)^2 * 12.35mm}{4}$$

$$V_3 = 6\,406.533mm^3 = 0.641E-5m^3$$

$$V_4 = \frac{\pi * (\phi_4)^2 * H_4}{4}$$

$$V_4 = \frac{\pi * (9mm)^2 * 12.40mm}{4}$$

$$V_4 = 788.854mm^3 = 7.889E-7m^3$$

Como se obtiene algunos valores de volumen, por lo tanto el volumen total es la suma de todos los volúmenes calculados.

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$V_T = [(1.032 + 6.096 + 0.641 + 7.889)E-5 + 7.889E-7]m^3$$

$$V_T = 7.848E-5m^3 = 78.48cm^3$$

➤ **Densidad del aceite.**

$$\rho_a = 886.1 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \Rightarrow \text{Anexo H}$$

➤ **Cantidad de masa de aceite a calentarse:**

$$\rho_a = \frac{m_a}{V_T} \quad (4.3)$$

$$m_a = \rho_a * V_T = 886.1 \frac{Kg}{m^3} * 7.848 E - 5 m^3$$

$$m_a = 0.07 \text{ Kg} \rightarrow \text{cantidad de masa a calentarse de aceite}$$

➤ **Calor Específico: Cp_a**

Como no se encontró tablas que den directamente el calor específico del aceite se procedió a utilizar la ecuación 2.27:

$$Cp_a = \frac{0.388 + 0.00045t}{SG^{0.5}}$$

$$t = T_{PROM} = 52.5^{\circ}C = 126.5^{\circ}F$$

$$SG = 0.8871 \Rightarrow \text{Anexo H}$$

$$Cp_a = \frac{0.388 + (0.00045 * 126.5)}{0.8871^{0.5}}$$

$$Cp_a = 0.472 \left[\frac{Btu}{lb * ^{\circ}F} \right] = 0.472 \left[\frac{Kcal}{kg * ^{\circ}C} \right]$$

➤ **Cantidad de calor (energía) que necesita el aceite.**

$$Q_a = m_a * C_{p_a} * \Delta T$$

$$Q_a = 0.07 \text{ Kg} * 0.472 \left[\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} \right] * (90 - 15) ^\circ\text{C}$$

$$Q_a = 2.478 \text{ Kcal} = 10\,374.890 \text{ J}$$

- **¿En qué tiempo se desea calentar el aceite para evaluar su viscosidad?**

Se asume un $t = 300\text{s} = 5 \text{ min}$

- **Cálculo del flujo másico del aceite.**

$$\dot{m}_a = \frac{m_a}{t}$$

$$\dot{m}_a = \frac{0.07 \text{ Kg}}{300 \text{ s}} = 2.333 \text{ E} - 4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$$

- **Cálculo de la potencia calorífica.**

$$\dot{Q}_a = \frac{Q_a}{t}$$

$$\dot{Q}_a = \frac{10\,374.890 \text{ J}}{300 \text{ s}}$$

$$\dot{Q}_a = 34.583 \text{ W}$$

4.3.3 **Análisis del flujo de agua caliente.**

Deben ser evaluadas sus propiedades a una temperatura promedio. Se asumió la temperatura final (T_{f1}) a la cual abandona el equipo y la temperatura inicial (temperatura a la

que entra el flujo de agua caliente, T_{01}), a la cual entra en el recipiente donde se encuentra el viscosímetro.

$$T_{f1} = 60^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{Asumido}$$

$$T_{01} = 95^{\circ}\text{C}$$

$$T_{PROM1} = \frac{(95 + 60)^{\circ}\text{C}}{2} = 77.5^{\circ}\text{C}$$

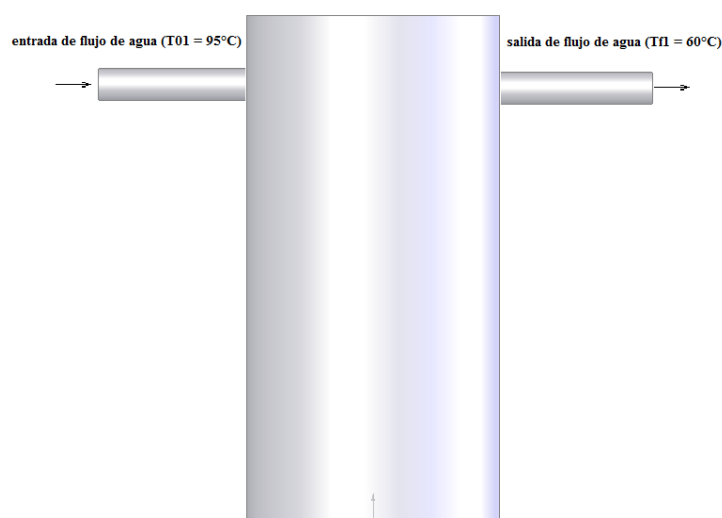


Figura 40. Entrada y salida del flujo de agua caliente.

➤ **Densidad.**

Mediante la interpolación se obtiene lo siguiente:

$$\rho_1 = 973.177 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \Rightarrow \text{Anexo D, Tabla D-2}$$

➤ **Calor específico.**

Se obtiene este valor de el Anexo D, Tabla D-2; interpolando:

$$Cp_1 = 4.191598 \frac{kJ}{Kg * ^oC} = 4191.598 \left[\frac{J}{Kg * ^oC} \right]$$

➤ **Cálculo del flujo másico.**

Balance de energía entre el fluido caliente y el aceite: Dividiendo para el tiempo (t=300s) se obtiene lo siguiente:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_a$$

$$\dot{m}_1 * Cp_1 * \Delta T_1 = 34.583 W$$

Donde:

\dot{m}_1 : Flujo másico de agua caliente.

Cp_1 : calor específico del agua caliente.

ΔT_1 : Variación de la temperatura a la entrada y a la salida del sistema.

$$\Delta T_1 = T_{01} - T_{f1}$$

$$\Delta T_1 = (95 - 60)^o C = 35^o C$$

$$\dot{m}_1 * Cp_1 * \Delta T_1 = 34.583 W$$

$$\dot{m}_1 = \frac{34.583 W}{Cp_1 * \Delta T_1}$$

$$\dot{m}_1 = \frac{34.583 \frac{J}{s}}{\left(4191.598 \frac{J}{Kg * ^oC} \right) * 35^o C}$$

$$\dot{m}_1 = 2.375 E - 4 \left[\frac{Kg}{s} \right] = 0.855 \left[\frac{Kg}{h} \right]$$

➤ **Cálculo del caudal de agua caliente: q_1**

$$q_1 = \frac{\dot{m}_1}{\rho_1} \quad (4.4)$$

Donde:

q_1 : Caudal de flujo caliente.

\dot{m}_1 : Flujo másico de agua caliente.

ρ_1 : Densidad del flujo (agua caliente).

$$q_1 = \frac{0.855 \left[\frac{Kg}{h} \right]}{973.177 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]}$$

$$q_1 = 8.786 E - 4 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 0.878 \left[\frac{lt}{h} \right]$$

➤ **Cálculo de la velocidad del flujo de agua (caliente):**

Se debe calcular la velocidad en cada cambio de sección; porque el diámetro externo no es constante en el viscosímetro tal como se ilustra en la figura 41. Al calcular todas las velocidades se debe escoger la velocidad más crítica; por lo tanto se toma la más alta para calcular el número de Reynolds.

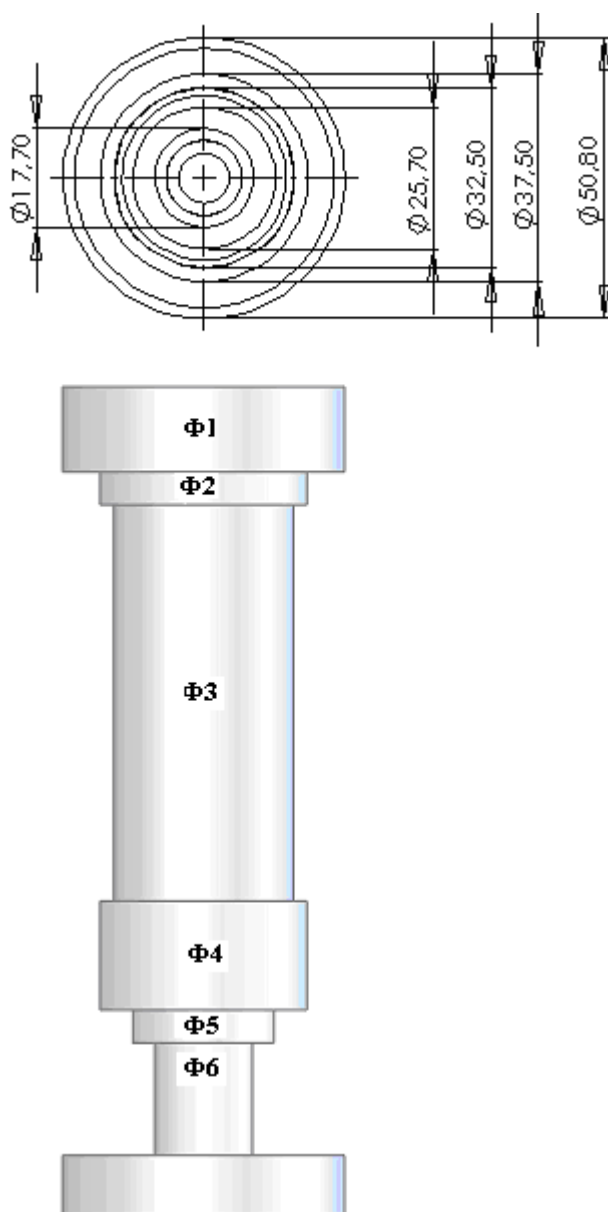


Figura 41, Diámetros externos del viscosímetro que son bañadas por el flujo de agua.

Los diámetros del viscosímetro que son bañadas por el flujo de agua son los siguientes: $\emptyset_1 = 50.8 \text{ mm}$, $\emptyset_2 = 37.5 \text{ mm}$, $\emptyset_3 = 32.5 \text{ mm}$, $\emptyset_4 = 37.5 \text{ mm}$, $\emptyset_5 = 25.7 \text{ mm}$, $\emptyset_6 = 17.70 \text{ mm}$

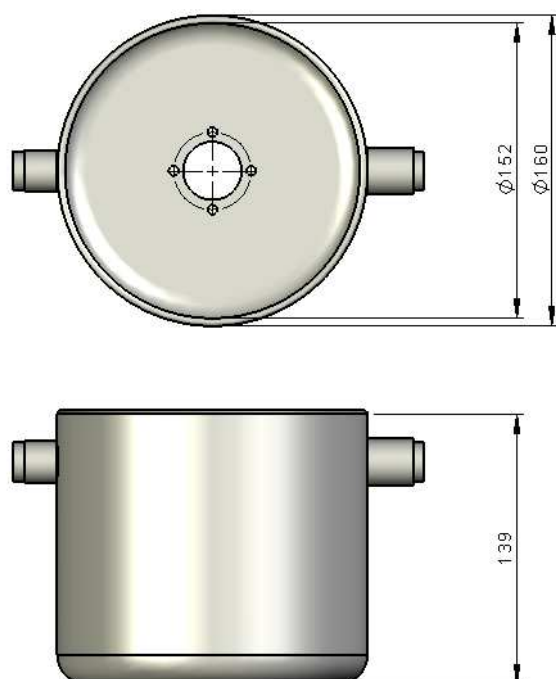


Figura 42. Medidas del recipiente del baño maría (unidades en mm).

Las medidas del recipiente de agua caliente son: $\varnothing_{\text{externo}}=160\text{mm}$ y $\varnothing_{\text{interno}}=152\text{mm}$, $h=139\text{mm}$.

➤ **Velocidad 1:**

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (\phi_{2\text{RECIPIENTE}}^2 - \phi_{1\text{VISCOSIMETRO}}^2)$$

$$\phi_{2\text{RECIPIENTE}} = 152\text{mm} = 0.152\text{ m}$$

$$\phi_{1\text{VISCOSIMETRO}} = 50.8\text{ mm} = 0.0508\text{ m}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (0.152^2 - 0.0508^2) \text{ m}^2$$

$$A_1 = 1.612 \text{ E} - 2 \text{ m}^2$$

$$v_1 = \frac{q_1}{A_1}$$

$$v_1 = \frac{8.786 E - 4 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{1.612 E - 2 m^2}$$

$$v_1 = 0.055 \left[\frac{m}{h} \right]$$

➤ **Velocidad 2:**

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (\phi_{2\text{ RECIPIENTE}}^2 - \phi_{IVISCOSIMETRO}^2)$$

$$\phi_{2\text{ RECIPIENTE}} = 152\text{ mm} = 0.152\text{ m}$$

$$\phi_{IVISCOSIMETRO} = 37.5\text{ mm} = 0.0375\text{ m}$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (0.152^2 - 0.0375^2) m^2$$

$$A_2 = 1.704 E - 2 m^2$$

$$v_2 = \frac{q_1}{A_2}$$

$$v_2 = \frac{8.786 E - 4 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{1.704 E - 2 m^2}$$

$$v_2 = 0.0522 \left[\frac{m}{h} \right]$$

➤ **Velocidad 3:**

$$A_3 = \frac{\pi}{4} (\phi_{2\text{ RECIPIENTE}}^2 - \phi_{IVISCOSIMETRO}^2)$$

$$\phi_{2\text{ RECIPIENTE}} = 152\text{ mm} = 0.152\text{ m}$$

$$\phi_{IVISCOSIMETRO} = 32.5\text{ mm} = 0.0325\text{ m}$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4} (0.152^2 - 0.0325^2) m^2$$

$$A_3 = 1.731 E - 2 m^2$$

$$v_3 = \frac{q_1}{A_3}$$

$$v_3 = \frac{8.786 E - 4 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{1.731 E - 2 m^2}$$

$$v_3 = 0.0507 \left[\frac{m}{h} \right]$$

➤ **Velocidad 4 es igual a la velocidad 2 porque presentan los mismos diámetros.**

$$v_4 = v_2 = 0.0522 \left[\frac{m}{h} \right]$$

➤ **Velocidad 5:**

$$A_5 = \frac{\pi}{4} (\phi_{2\text{ RECIPIENTE}}^2 - \phi_{IVISCOSIMETRO}^2)$$

$$\phi_{2\text{ RECIPIENTE}} = 152\text{ mm} = 0.0152\text{ m}$$

$$\phi_{IVISCOSIMETRO} = 25.7\text{ mm} = 0.0257\text{ m}$$

$$A_5 = \frac{\pi}{4} (0.0152^2 - 0.0257^2) m^2$$

$$A_5 = 1.763 E - 2 m^2$$

$$v_5 = \frac{q_1}{A_5}$$

$$v_5 = \frac{8.786 E - 4 \left[\frac{m^3}{h} \right]}{1.763 E - 2 m^2}$$

$$v_5 = 0.0498 \left[\frac{m}{h} \right]$$

➤ **Velocidad 6:**

$$A_6 = \frac{\pi}{4} (\phi_{2\text{ RECIPIENTE}}^2 - \phi_{1\text{ VISCOSIMETRO}}^2)$$

$$\phi_{2\text{ RECIPIENTE}} = 152\text{ mm} = 0.152\text{ m}$$

$$\phi_{1\text{ VISCOSIMETRO}} = 17.7\text{ mm} = 0.0177\text{ m}$$

$$A_6 = \frac{\pi}{4} (0.152^2 - 0.0177^2) \text{ m}^2$$

$$A_6 = 1.790 \text{ E} - 2 \text{ m}^2$$

$$v_6 = \frac{q_1}{A_6}$$

$$v_6 = \frac{8.786 \text{ E} - 4 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]}{1.790 \text{ E} - 2 \text{ m}^2}$$

$$v_6 = 0.0491 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right]$$

Se toma la velocidad más crítica, por lo tanto se toma la velocidad más alta y corresponde a la velocidad 1.

$$v_1 = 0.055 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right]$$

Con esta velocidad crítica se calcula el número de Reynolds del flujo de agua caliente.

➤ **Cálculo del número de Reynolds del flujo de agua caliente.**

Se utiliza la ecuación 2.32, donde ϕ_m es el diámetro medio de la corona circular.

$$Re = \frac{v * \phi_m * \rho}{\mu}$$

Todas las propiedades del agua se deben evaluar a una temperatura promedio ($T_{PROM}=77.5^{\circ}\text{C}$); estas propiedades se obtuvieron de las tablas que están ubicadas en el Anexo D, Tabla D-2, interpolando:

$$\mu = 3.683 \text{ E} - 4 \text{ Pa} * \text{s} = 3.683 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}} \right]$$

$$v_l = 0.055 \left[\frac{\text{m}}{\text{h}} \right] \text{ VELOCIDAD CRÍTICA}$$

$$\phi_2 = 152 \text{ mm} = 0.152 \text{ m}$$

$$\phi_1 = 52.8 \text{ mm} = 0.0528 \text{ m}$$

$$\phi_m = \frac{\phi_2 + \phi_1}{2} = \frac{(152 + 52.8) \text{ mm}}{2} = 102.4 \text{ mm} = 0.1024 \text{ m}$$

$$Re = \frac{0.055 \left(\frac{\text{m}}{\text{h}} \right) * 0.1024 \text{ m} * 973.177 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)}{3.683 \text{ E} - 4 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}} \right) * \left(\frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right)}$$

$$Re = 4.173$$

Como $Re < 2000$ entonces se trata de un flujo laminar.

4.3.4 ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.

➤ Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección del aceite; (h_a)

$$T_{PROM} = \frac{T_f + T_o}{2}$$

$$T_{PROM} = \frac{(90 + 15)^{\circ}\text{C}}{2} = 52.5^{\circ}\text{C}$$

$$RELX = \left(\frac{cSt \text{ a } 100^{\circ}C}{cSt \text{ a } 40^{\circ}C} \right) * 1000$$

$$RELX = \left(\frac{74.9}{1018} \right) * 1000$$

$$RELX = 73.576$$

$$n = \frac{52.5 - 40}{10} = 1.25$$

$$CP = 0.653 \Rightarrow \text{ANEXOC, INTERPOLANDO}$$

$$\text{Viscosidad a } 52.5^{\circ}C = (\text{Viscosidad a } 40^{\circ}C) * (CP)^n$$

$$\text{Viscosidad a } 52.5^{\circ}C = 1018 \text{ cSt} * (0.653)^{1.25}$$

$$\text{Viscosidad a } 52.5^{\circ}C = 597.571 \text{ cSt}$$

$$\text{Viscosidad a } 52.5^{\circ}C = 5.976 \left(\frac{m^2}{s} \right) = 23.144 \left(\frac{ft^2}{h} \right) = \nu$$

La siguiente ecuación se puede utilizar para encontrar el coeficiente de transferencia de calor del aceite por convección:⁴⁷

$$\frac{h_a * D}{k} = a * \left(\frac{L^2 * N * \rho_a}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{Cp_a * \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right) \quad (4.5)$$

Donde:

$$h_a: \quad \text{Coeficiente convectivo del aceite, } \left(\frac{BTU}{h * ft^2 * ^{\circ}F} \right)$$

D: Diámetro del recipiente donde va colocado el agitador, (ft).

$$D = 29.7 \text{ mm} = 0.0974 \text{ ft}$$

⁴⁷ CHOPEY NICHOLAS & HICKS TYLER: MANUAL DE CÁLCULOS DE INGENIERÍA QUÍMICA, 7-30, 7-31.

k: Conductividad térmica del aceite, $\left(\frac{BTU}{h * ft * ^\circ F} \right)$, para encontrar este dato se basa en la ecuación 2.28:

$$k_a = \frac{0.0677}{S} (1 - 0.0003(t - 32))$$

$$k_a = \frac{0.0677}{0.8871} [1 - 0.0003(52.5 - 32)]$$

$$k_a = 0.0742 \left[\frac{BTU}{h * ft * ^\circ C} \right]$$

a: Factor en función del agitador y del recipiente. Este dato se obtiene en el Anexo I.

$$a = 0.36$$

ρ_a : Densidad del aceite, $\left(\frac{lb}{ft^3} \right)$

$$\rho_a = 886.1 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = 55.369 \left[\frac{lb}{ft^3} \right]$$

μ : Viscosidad dinámica, $\left(\frac{lb}{h * ft} \right)$

$$\mu = \nu * \delta_a$$

$$\mu = 23.144 \left(\frac{ft^2}{h} \right) * 55.369 \left(\frac{lb}{ft^3} \right)$$

$$\mu = 1273.496 \left(\frac{lb}{h * ft} \right)$$

L: Diámetro del agitador.

$$L = 0.015m = 0.0492ft$$

N: Revoluciones del motor del agitador, $\left(\frac{rev}{h}\right)$. En el diseño mecánico del agitador (Anexo) se encuentran todos estos datos tanto las revoluciones del motor, diámetro del agitador, diámetro del viscosímetro donde va ubicado el agitador.

$$N = 45 \frac{rev}{min} = 2700 \frac{rev}{h}$$

Cp_a : Calor específico del aceite, $\left(\frac{Btu}{lb * ^\circ F}\right)$. Este dato se encontró anteriormente.

$$Cp_a = 0.472 \left[\frac{Btu}{lb * ^\circ F} \right]$$

$$\frac{\mu_b}{\mu_w} = 1$$

$$\frac{h_a * D}{k} = a * \left(\frac{L^2 * N * \rho_a}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{Cp_a * \mu}{k} \right)^{\frac{1}{3}} * 1$$

$$h_a = \frac{a * k * \left(L^2 * N * \rho_a \right)^{\frac{2}{3}} * (Cp_a * \mu)^{\frac{1}{3}}}{D * (\mu)^{\frac{2}{3}} * (k)^{\frac{1}{3}}}$$

$$(Cp_a * \mu)^{\frac{1}{3}} = (0.472 * 1273.496)^{\frac{1}{3}} = 8.439$$

$$h_a = \frac{0.36 * 0.0742 * \left[(0.0492)^2 * 2700 * 55.369 \right]^{\frac{2}{3}} * 8.439}{0.0974 * (1273.496)^{\frac{2}{3}} * (0.0742)^{\frac{1}{3}}}$$

$$h_a = 2.38 \left[\frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} \right] = 13.514 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$$

➤ **h_1 convectivo del flujo de agua caliente.**

Convección forzada régimen laminar ($Re < 2000$) se aplica la fórmula 2.38:

$$N_{Nu} = \frac{h * \phi_m}{k} = 2.34 \left(\frac{D}{x} * R_e * N_{Pr} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$k = 0.669 \left[\frac{W}{m * ^\circ C} \right] \text{ Anexo D, Tabla D-2; interpolando.}$$

$\emptyset_m = D$: Diámetro medio. ($\emptyset_m = 102.4 \text{ mm} = 0.1024 \text{ m}$).

X: Longitud bañada en el viscosímetro. ($H = 118.75 \text{ mm} = 0.11875 \text{ m}$)

$N_{Pr} = 2.305$ Anexo D, Tabla D-2; interpolando.

$$Nu = 2.34 \left[\frac{D}{X} * Re * N_{Pr} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 2.34 * \left[\left(\frac{102.4 \text{ mm}}{118.75 \text{ mm}} \right) * 4.173 * 2.305 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 4.737$$

$$Nu = \frac{h_l * D}{k}$$

$$h_l = \frac{Nu * k}{D}$$

$$h_l = \frac{4.737 * 0.669 \left[\frac{W}{m * ^\circ C} \right]}{0.1024 \text{ m}}$$

$$h_l = 30.948 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$$

➤ **Análisis del coeficiente de transferencia de calor por convección natural del aire (h_∞).**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire se aplica la ecuación 2.42:

$$h_\infty = b * (T)^m * (L)^{3m-1}$$

$b = 0.28 \Rightarrow$ Anexo J.

$T = 15^\circ\text{C} = 59^\circ\text{F}$.

$m = 1/4 \Rightarrow$ Anexo J.

$L = 118.75 \text{ mm} = 0.03895 \text{ ft}$

$$h_{\infty} = 0.28 * (59)^{\frac{1}{4}} * \left[0.0389 \left(\left(\frac{3 * \frac{1}{4}}{4} \right) - 1 \right) \right]$$

$$h_{\infty} = 1.747 \left[\frac{BTU}{h * ft^2 * ^\circ F} \right] = 9.92 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$$

4.3.5 Cálculo de las resistencias térmicas.

Para realizar éste cálculo vamos a partir que el viscosímetro sea de un solo diámetro ($\varnothing = 29.7 \text{ mm}$; que es el diámetro predominante) observar la figura 43; para realizar el análisis de las resistencias térmicas por conducción de calor en paredes cilíndricas; porque los libros llevan a figuras conocidas como lo es una pared plana, cilindros, esferas; para el cálculo de las resistencias térmicas.

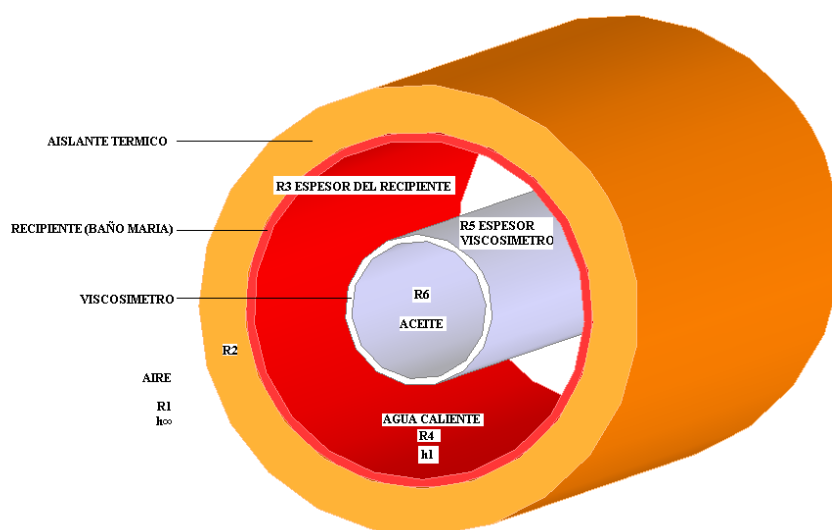


Figura 43. Resistencias que intervienen en el sistema.

- **Todas las resistencias que intervienen están en serie.**

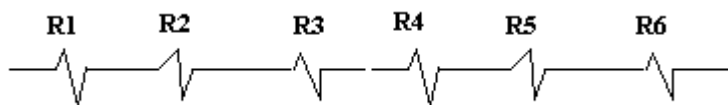


Figura 44. Resistencias térmicas.

R1: resistencia térmica del aire por convección.

R2: resistencia térmica por conducción del aislante térmico (lana de vidrio)

R3: resistencia térmica por conducción del espesor del recipiente (flujo de agua).

R4: resistencia térmica por convección del flujo de agua caliente.

R5: resistencia térmica por conducción del espesor del viscosímetro.

R6: resistencia térmica por convección del aceite.

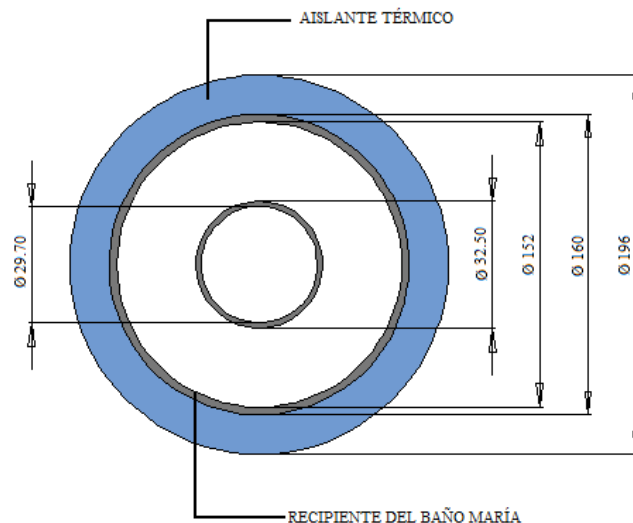


Figura 45. Diámetros de los distintos materiales que intervienen de la figura anterior.

- **Resistencia térmica por convección desde el fluido (aceite) hasta la superficie de la pared del viscosímetro.**

$$R6 = \frac{l}{h_a * A_a}$$

Donde:

h_a : Coeficiente convectivo del aceite.

A_a : Área del viscosímetro que esté en contacto con el aceite.

$$A_a = 2 * \pi * r_a * L$$

$$A_a = 2 * \pi * \left(\frac{29.7 \text{ mm}}{2} \right) * 118.75 \text{ mm}$$

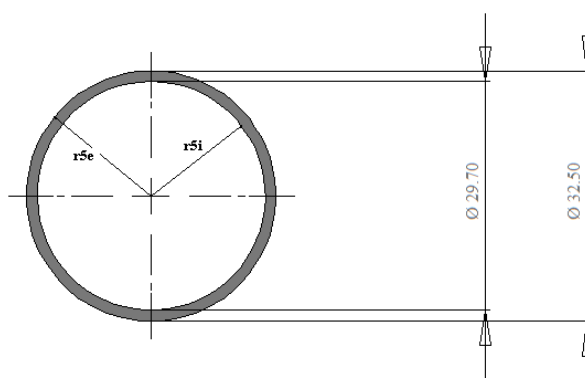
$$A_a = 11.080.005 \text{ mm}^2$$

$$A_a = 1.108 \text{ E} - 2 \text{ m}^2$$

$$R6 = \frac{1}{13.514 \left(\frac{W}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}} \right) * 1.108 \text{ E} - 2 \text{ m}^2}$$

$$R6 = 6.852 \left(\frac{^\circ\text{C}}{W} \right)$$

➤ **Resistencia térmica por conducción en la pared del viscosímetro.**



$$R5 = \frac{\ln \left(\frac{r_{5e}}{r_{5i}} \right)}{2 * \pi * k_{\text{acero}} * L}$$

Donde:

r_{5e} : Radio exterior de la pared del viscosímetro ($r_{5e} = 32.8 \text{ mm} / 2 = 16.4 \text{ mm}$).

r_{5i} : Radio interior de la pared del viscosímetro ($r_{5i} = 29.7\text{mm}/2 = 14.85\text{mm}$).

k_{acero} : Conductividad térmica del acero; (acero inoxidable AISI 304; Anexo K).

Interpolando a una temperatura de 95°C (368°K) se obtiene:

$$k_{\text{acero}} = 15.96 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{K}} \right) = 15.96 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right)$$

L : Longitud del recipiente (viscosímetro).

$$R5 = \frac{\ln \left(\frac{16.4}{14.85} \right)}{2 * \pi * 15.96 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right) * 0.11875\text{m}}$$

$$R5 = 0.00834 \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right)$$

➤ **Resistencia térmica por convección desde el fluido (flujo de agua caliente) hasta la superficie de la pared del recipiente.**

$$R4 = \frac{1}{h_l * A_4}$$

Donde:

h_l : Coeficiente convectivo del flujo de agua caliente.

A_4 : Área del recipiente por donde circula el agua caliente; (diámetro interno del recipiente, $\varnothing_{\text{interno}} = 152\text{ mm}$).

$$A_l = 2 * \pi * r_4 * L$$

$$A_l = 2 * \pi * \left(\frac{152 \text{ mm}}{2} \right) * 118.75 \text{ mm}$$

$$A_l = 56705.747 \text{ mm}^2$$

$$A_l = 5.670 \text{ E} - 2 \text{ m}^2$$

$$R4 = \frac{1}{30.948 \left(\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right) * 5.670 \text{ E} - 2 \text{ m}^2}$$

$$R4 = 0.570 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

➤ **Resistencia térmica por conducción en la pared del recipiente cilíndrico.**

$$R3 = \frac{\ln \left(\frac{r_{3e}}{r_{3i}} \right)}{2 * \pi * k_{\text{acero}} * L}$$

Donde:

r_{3e} : Radio exterior del recipiente del baño maría ($r_{3e} = 160 \text{ mm} / 2 = 80 \text{ mm}$).

r_{3i} : Radio interior del recipiente del baño maría ($r_{3i} = 152 \text{ mm} / 2 = 76 \text{ mm}$).

k_{acero} : Conductividad térmica del acero inoxidable AISI 304, Anexo K.

$$k_{\text{acero}} = 15.96 \left(\frac{W}{m * ^\circ K} \right) = 15.96 \left(\frac{W}{m * ^\circ C} \right)$$

L: Altura del recipiente del baño maría, L = 139 mm.

$$R3 = \frac{\ln \left(\frac{80}{76} \right)}{2 * \pi * 15.96 \left(\frac{W}{m * ^\circ C} \right) * 0.139 \text{ m}}$$

$$R3 = 0.00368 \left(\frac{^\circ C}{W} \right)$$

➤ **Resistencia térmica en conducción a través del aislante térmico.**

El aislante térmico que se utilizó es la lana de vidrio. El espesor del aislante que se colocó es de 18 mm alrededor de los recipientes, ($t = 18 \text{ mm}$).

$$R2 = \frac{\ln \left(\frac{r_{2e}}{r_{2i}} \right)}{2 * \pi * k_2 * L}$$

Donde:

r_{2e} : Radio exterior del recipiente del baño más el espesor de la lana de vidrio, $r_{2e} = (160 + 2 * t) / 2 = 98 \text{ mm}$.

r_{2i} : Radio interior. Este radio interior viene a ser el radio exterior del recipiente del baño maría, ($r_{2i} = 160 \text{ mm} / 2 = 80 \text{ mm}$).

k_2 : Conductividad térmica del aislante térmico (lana de vidrio), Anexo N.

$$k_2 = 0.024 \left(\frac{\text{Btu}}{\text{h} * \text{ft} * ^\circ\text{C}} \right) = 0.0415 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}} \right)$$

L: Longitud del recipiente donde se ubica el aislante térmico.

$$R2 = \frac{\ln \left(\frac{98}{80} \right)}{2 * \pi * 0.0415 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} * ^\circ\text{C}} \right) * 0.139 \text{ m}}$$

$$R2 = 5.60 \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \right)$$

- **Resistencia térmica por convección desde la superficie de la pared del aislante hasta el fluido (aire).**

$$Rl = \frac{l}{h_{\infty} * A_{\infty}}$$

Donde:

h_{∞} : Coeficiente convectivo del flujo de aire

A_{∞} : Área que está en contacto con el aire.

$$A_{\infty} = 2 * \pi * r_{\infty} * L_{\infty}$$

$$A_{\infty} = 2 * \pi * \left(\frac{196mm}{2} \right) * (139 + 2t)mm$$

$$A_{\infty} = 107756.628 mm^2$$

$$A_{\infty} = 0.1078 m^2$$

$$Rl = \frac{l}{9.92 \left(\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right) * 0.1078 m^2}$$

$$Rl = 0.935 \left(\frac{^{\circ}C}{W} \right)$$

4.3.6 **Cálculo de la potencia que consumen las resistencias eléctricas.**

- **Resistencias de inmersión.**

Este tipo de resistencia se utilizaron en el proyecto para el calentamiento del fluido (agua), figura 46. Estas resistencias son fabricadas con blindaje de cobre, acero, o acero

inoxidable, según el líquido a calentar. Estas resistencias tienen una rosca la cual sirve para adaptarlas en el recipiente para uso en inmersión.

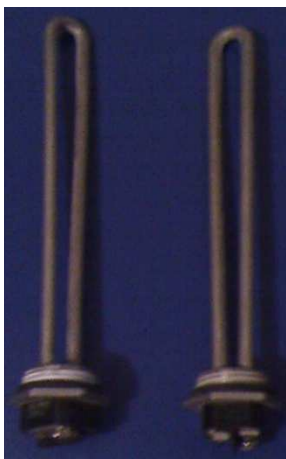


Figura 46. Resistencias eléctricas de inmersión.

➤ **Utilización.**

Tienen varias aplicaciones, tales como:

- Tanques.
- Oleoductos.
- Aceites.
- Soluciones leves.
- Etc.

➤ **Cálculo del volumen del recipiente donde se encuentra ubicado las resistencias eléctricas.**

Las medidas del recipiente son: $\varnothing_{\text{interno}} = 21 \text{ cm}$, $\varnothing_{\text{externo}} = 21.4 \text{ cm}$, $h = 19.4 \text{ cm}$.

$$V = \frac{\pi * \phi_{interno}^2 * h}{4}$$

$$V = \frac{\pi * 21^2 * 19,4}{4}$$

$$V = 6719.395 cm^3 = 6.719 lt$$

➤ **Cantidad de masa de agua que entra en el recipiente.**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho * V$$

$$\rho = 973.177 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \Rightarrow \text{Anexo D, Tabla D-2}$$

$$m = 973.177 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] * 6.719 E-3 m^3$$

$$m = 6.54 Kg$$

➤ **Cantidad de calor (Energía) que necesita el agua para calentarse.**

$$Q = m * Cp * \Delta T$$

$$Cp = 4191.598 \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right]$$

$$Q = 6.539 Kg * 4191.598 \left[\frac{J}{Kg * ^\circ C} \right] * (95 - 15) ^\circ C$$

$$Q = 2192762.768 J$$

➤ **Potencia requerida en las resistencias eléctricas.**

$$Pot = \frac{Q}{t}$$

$$Pot = \frac{2192762.768 J}{300 s} = 7.31 KW$$

Con el tiempo de 300s, resulta una potencia demasiado alta, por lo tanto el tiempo en que la resistencias eléctricas llega a una temperatura máxima ($T=95^{\circ}\text{C}$) debería ser en un tiempo de 730 s.

$$Pot = \frac{2192762.768J}{730s} = 3003.784W \approx 3KW$$

Se necesita una resistencia eléctrica con una potencia de 3KW. En el mercado existían resistencias eléctricas con una potencia de 1.5KW, por lo tanto hay la necesidad de adquirir dos.

➤ **Corriente que consumen las resistencias eléctricas.**

$$Pot = I * V$$

$$I = \frac{1500W}{120V}$$

$$I = 12,5Amp$$

La corriente que consume cada resistencia eléctrica es de 12,5 amperios. Para la potencia de 3KW que se necesita, las resistencias eléctricas consumirán un total de 25 amperios.

CAPÍTULO V

5 PRUEBAS.

Las pruebas se realizaron con tres aceites diferentes como son: SAE 40, SAE 15W40 Y SAE 10W30; para comparar estos valores de viscosidad cinemática teóricos los obtenidos experimentalmente en el laboratorio.

GRADO SAE 40.

Es un aceite monogrado de calidad superior para uso en automóviles de pasajeros. Este aceite está formulado para cumplir los requisitos de lubricación de motores de diesel, exigidos por los fabricantes de motores que recomienda un nivel de calidad API.

Este aceite está elaborado a partir de bases lubricantes altamente refinadas y un paquete de aditivos especialmente seleccionados, que le confiere propiedades antidesgaste, antioxidante, detergente y dispersante, además de propiedades anticorrosivas, las cuales prolongan la vida útil del motor.

Características.

Tabla XVI. Parámetro del Grado SAE 40.

Grado SAE	40
Punto de inflamación Min, °C	246
Punto de fluidez Max, °C	-21
Viscosidad a 40°C, cSt	140
Viscosidad a 100°C, cSt	15.5
Índice de viscosidad Min	102

GRADO SAE 15W40.**Características.****Tabla XVII.** Parámetros del Grado SAE 15W40

Grado SAE	15W40
Punto de inflamación Min, °C	248
Punto de fluidez Max, °C	-27
Viscosidad a 40°C, cSt	114.3
Viscosidad a 100°C, cSt	14.9
Índice de viscosidad Min	137

GRADO SAE 10W30.

El SAE 10W30 es un aceite multifuncional, es decir, capaz de garantizar la más adecuada lubricación, en cualquier clima y tipo de motor, independientemente del tipo de combustible utilizado.

EL SAE 10W30 está formulado con un sistema de aditivos especialmente seleccionados y balanceados, demostrando ampliamente su capacidad para soportar las condiciones más severas de operación durante largos períodos, dando un amplio margen de protección al motor. Esto le permite ofrecer:

- Rendimiento excepcionalmente alto.
- Excelente protección a la máquina durante su uso.
- Excelente viscosidad en todos los climas.
- Encendido instantáneos en climas fríos.
- Máxima protección en climas cálidos.
- Desempeño superior en las condiciones más severas de operación.

- Máxima limpieza interna del motor.

Características.

Tabla XVIII. Parámetros del Grado SAE 10W30.

Grado SAE	10W30
Punto de inflamación Min, °C	245
Punto de fluidez Max, °C	-33
Viscosidad a 40°C, cSt	72.3
Viscosidad a 100°C, cSt	10.8
Índice de viscosidad Min	150

5.1 VALORES EXPERIMENTALES.

SAE 40

Para realizar la comparación con los datos proporcionados por los distribuidores de aceites se procedió a la toma de datos experimentales a las siguientes temperaturas. Todos estos valores de temperatura fueron tomados dentro de un rango entre 40 y 50 °C debido a la inercia térmica del fluido (baño maría).

Tabla XIX. Valores de viscosidad experimental grado SAE 40 desde 40 a 45°C

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)
40	684,77	150,39
41	672,95	147,78
41	665,95	146,24
43	605,58	132,93
45	545,56	119,69

Para el cálculo de la viscosidad cinemática se procedió a utilizar la ecuación 2.26.

$$v = 0.22 t - \frac{180}{t}$$

$$v = 0.22(684,77) - \frac{180}{684,77}$$

$$v = 150,39 \text{ cSt}$$

Se procedió también a la toma de datos a otras temperaturas como se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla XX. Valores de viscosidad experimental grado SAE 40 desde 71 a 74°C.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. v(cSt)
71	179,77	38,55
72	175,63	37,61
73	172,77	36,97
73	170,48	36,45
74	165,33	35,28

SAE 15W40.

Tabla XXI. Valores de viscosidad experimental grado SAE 15w40 desde 40 a 43°C.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. v(cSt)
40	545,72	119,73
40	540,65	118,61
41	499,31	109,49
42	494,54	108,43
43	480,78	105,40

Tabla XXII. Valores de viscosidad experimental grado SAE 15W40 desde 70 a 74°C.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)
70	182,32	39,12
70	177,74	38,09
72	172,42	36,89
73	170,09	36,36
74	165,34	35,29

GRADO SAE 10W30.**Tabla XXIII.** Valores de viscosidad experimental grado SAE 10W30 desde 44 a 46°C

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)
44	272,58	59,31
44	263,99	57,40
45	260,35	56,59
45	254,7	55,33
46	244,83	53,13

Tabla XXIV. Valores de viscosidad experimental grado SAE 10W30 desde 71 a 72°C

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)
71	128,59	26,89
71	120,78	25,08
71	120,07	24,92
72	119,79	24,85
72	117,03	24,21

5.2 COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES DE VISCOSIDAD CON LOS APORTADOS POR LOS FABRICANTES, PARA EVALUAR EL ERROR PORCENTUAL.

Para comparar los parámetros tabulados con los experimentales y poder evaluar el error porcentual se procede a utilizar la siguiente fórmula:

$$\%E = \left| \frac{V_{EXPERIMENTAL} - V_{TABULADO}}{V_{TABULADO}} \right| * 100$$

Comparación y cálculo del error porcentual del aceite SAE 40.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. v(cSt)	Viscosidad cinemática Tab. v(cSt)	%Error
40	684,77	150,39	152	1,06%
41	672,95	147,78	142	4,07%
41	665,95	146,24	142	2,99%
43	605,58	132,93	127,3	4,42%
45	545,56	119,69	116	3,18%

Cálculo tipo del error porcentual:

$$\%E = \left| \frac{150,39 - 152}{152} \right| * 100$$

$$\%E = 1,06\%$$

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. v(cSt)	Viscosidad cinemática Tab. v(cSt)	%Error
71	179,77	38,55	37,5	2,79%
72	175,63	37,61	36,2	3,91%
73	172,77	36,97	34	8,73%
73	170,48	36,45	34	7,21%
74	165,33	35,28	33,6	5,01%

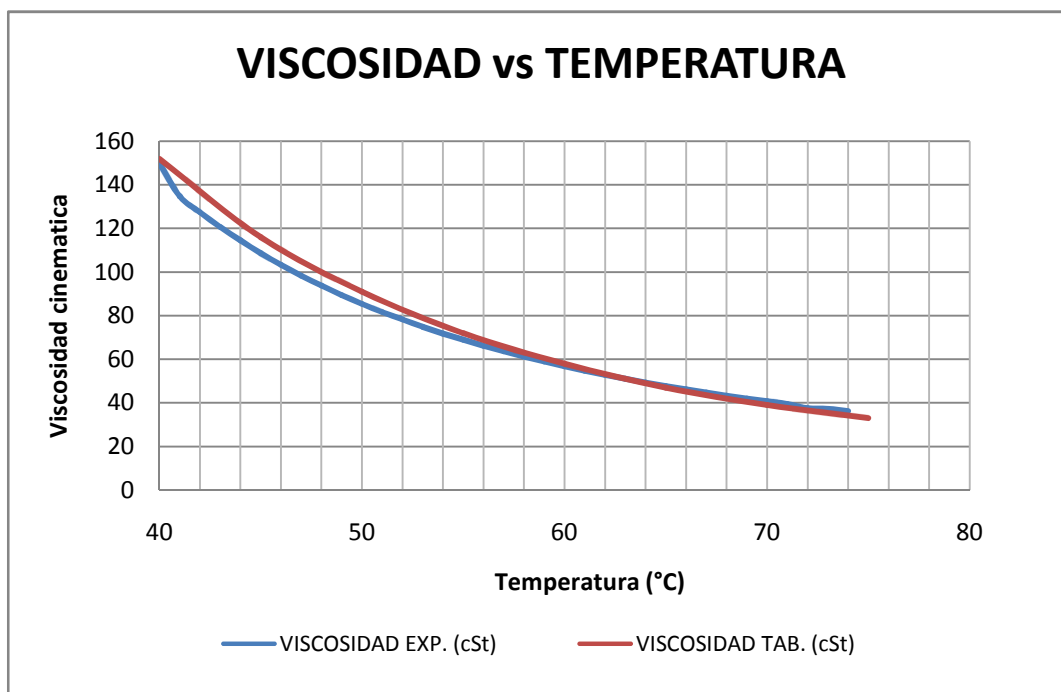


Figura 47. Viscosidad vs Temperatura del aceite grado SAE 40.

Comparación y cálculo del error porcentual del aceite SAE 15W40.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)	Viscosidad cinemática Tab. ν (cSt)	%Error
40	545,72	119,73	116,1	3,13%
40	540,65	118,61	116,1	2,16%
41	499,31	109,49	109,8	0,28%
42	494,54	108,43	105,5	2,78%
43	480,78	105,40	101,6	3,74%

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)	Viscosidad cinemática Tab. ν (cSt)	%Error
70	182,32	39,12	36,6	6,89%
70	177,74	38,09	36,6	4,07%
72	172,42	36,89	33,6	9,79%
73	170,09	36,36	33	10,19%
74	165,34	35,29	32,4	8,91%

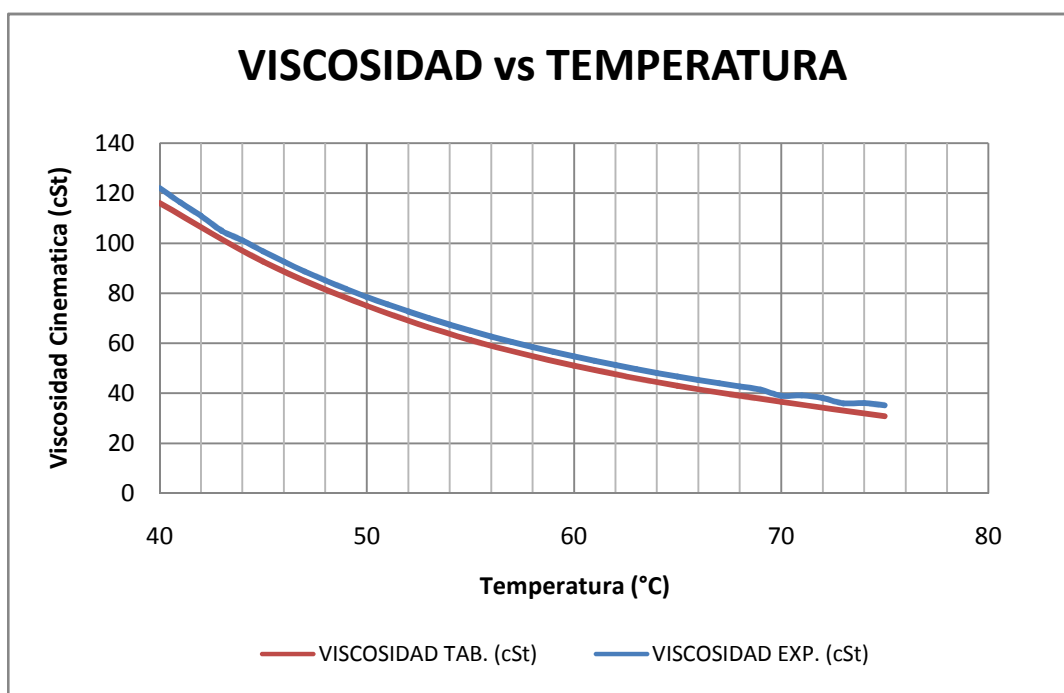


Figura 48. Viscosidad vs Temperatura de un aceite grado SAE 15W40.

Comparación y cálculo del error porcentual del aceite SAE 10W30.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)	Viscosidad cinemática Tab. ν (cSt)	%Error
44	272,58	59,31	56,6	4,78%
44	263,99	57,40	56,6	1,41%
45	260,35	56,59	57,5	1,59%
45	254,7	55,33	57,5	3,78%
46	244,83	53,13	58	8,40%

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Viscosidad cinemática Exper. ν (cSt)	Viscosidad cinemática Tab. ν (cSt)	%Error
71	128,59	26,89	25,1	7,13%
71	120,78	25,08	25,1	0,07%
71	120,07	24,92	25,1	0,73%
72	119,79	24,85	26,4	5,87%
72	117,03	24,21	26,4	8,30%

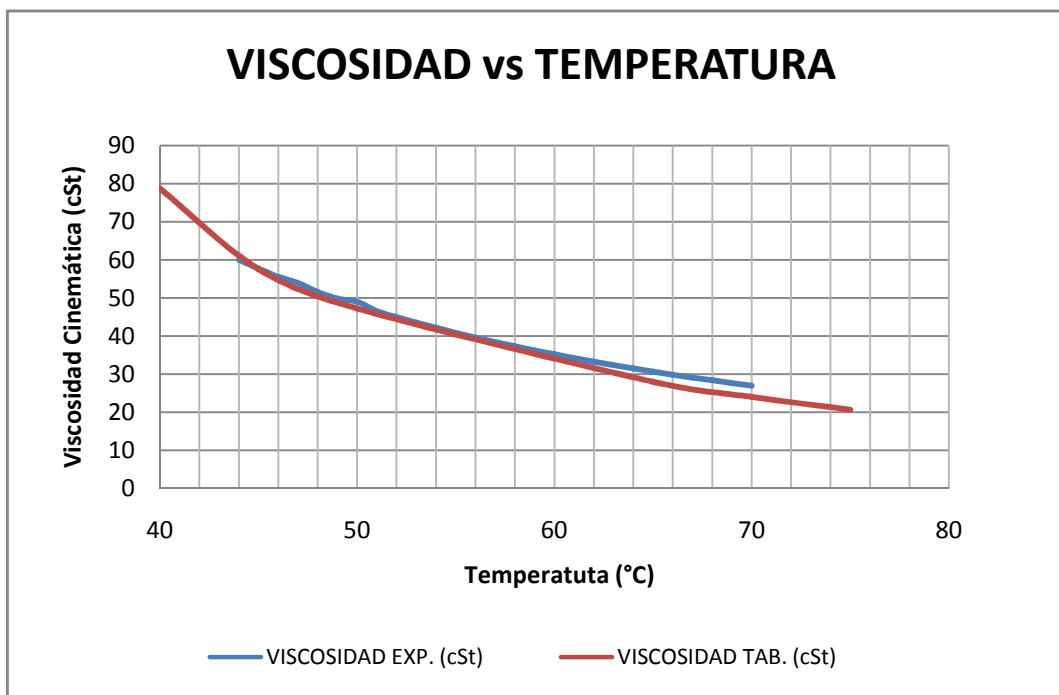


Figura 49. Viscosidad vs Temperatura de un aceite Grado SAE 10W30.

5.3 ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN.

Para el funcionamiento del equipo (Viscosímetro Saybolt Universal) se deben seguir los siguientes pasos:

- Accionar el breaker de encendido general.
- Esperar unos segundos hasta que se cargue el programa en la pantalla, cuando esté listo aparecerá “SELECCIONAR MODO”; elegir el modo en que se desee operar al equipo, este puede ser AUTOMÁTICO O MANUAL.

➤ **MODO AUTOMÁTICO:**

- En caso de que se elija el modo automático se debe accionar el pulsador asignado a este motivo e inmediatamente se enciende la bomba hasta alcanzar el nivel deseado,

desde el encendido de la bomba, transcurre 3 minutos, acto seguido se enciende las resistencias eléctricas junto con los controladores.

- El usuario enseguida debe setear el controlador 1 a la temperatura que va a determinar la viscosidad del fluido. De acuerdo a la temperatura del controlador C1 se debe setear a una temperatura mayor el controlador C2, dado que este maneja la temperatura del agua de calefacción del aceite, así no se obtendrá errores en la medición de la viscosidad.
- Una vez que el controlador C1 llegue a la temperatura deseada, retirar el corcho del viscosímetro para que el fluido empiece a descender en el recipiente de 60 ml. En el instante de retirar el corcho se debe cronometrar el tiempo de llenado de dicho recipiente.

Si la bomba de recirculación de agua llega a su nivel superior está se desactiva automáticamente y si llega a su nivel inferior se encenderá. Este ciclo puede mantenerse indefinidamente o hasta que el usuario así lo desee.

➤ **MODO MANUAL:**

- En caso de que el modo manual sea elegido, se debe encender la bomba accionando el pulsador asignado, para apagar la bomba se debe activar el pulsador off de la bomba. Para encender y apagar las resistencias se procede de idéntica forma del encendido de la bomba mediante la acción de los pulsadores asignados.
- Una vez encendido los controladores se setea la temperatura a la que se va a trabajar en el controlador C1, después de llegar a la temperatura seteada se procede del misma manera que el descrito en el “modo automático”.

- Como el caso anterior la temperatura seteada del controlador C2 debe ser mayor que la seteada en el controlador C1.
- Una vez terminado la prueba se procede a activar el pulsador off automático el cual desactiva todo el sistema de control, luego de realizar esto se baja el breaker para apagar en su totalidad el banco de pruebas.
- Se recomienda que antes de pulsar el breaker de apagado general la perrilla de Selección de Modo no quede en automático ni en manual, para evitar el arranque inesperado de la bomba de recirculación de agua.

CAPÍTULO VI

6 COSTOS.

6.1 COSTOS DIRECTOS.

Debe considerarse costos de materiales, equipos, herramientas, mano de obra y transporte, los cuales serán detallados en las siguientes tablas.

6.1.1 Materiales.

Tabla XXV. Costos por materiales empleados.

SISTEMA	ELEMENTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL [USD]
SISTEMA HIDRÁULICO	Recipiente cilíndrico acero inoxidable (baño maría) AISI 304	1	Pieza	45,95	45,95
	Recipiente cilíndrico acero inoxidable AISI 304 (calentamiento del agua)	1	Pieza	54,35	54,35
	Bandeja de recolección del agua para la circulación AISI 304	1	Pieza	41,21	41,21
	Plancha acero inoxidable ASTM A36 e=1,5mm	0,45	Plancha	22,66	10,197
	Tubería de cobre 5/8"	4	metro	7,8	31,2
	Tubería de cobre 1/4"	2	metro	2,8	5,6
	Válvula de paso rosca 5/8"	1	componente	34	34
	Tuerca de Bronce 5/8"	9	componente	1,5	13,5
	Abrazaderas 1 1/2"	4	Pieza	0,25	1
	Abrazaderas 4"	5	Pieza	0,5	2,5
	Uniones bronce 5/8"	3	componente	3,5	10,5
	Uniones bronce 1/4"	3	componente	1,75	5,25
	Codo 5/8"x 1/2	3	componente	3,5	10,5
	Pie de amigo	4	pieza	0,6	2,4
	Manguera	1,6	componente	5,5	8,8
	Teflón	5	componente	0,35	1,75
	Filtro	1	componente	1	1
	Bomba de gasolina OSSCA	1	componente	17,85	17,85

SUB TOTAL					297,557
SISTEMA TÉRMICO	Plancha lana de vidrio	1	Planchas	6	6
	Fibra cerámica 1 1/2"	1	Planchas	35	35
	Caño aislante 5/8 * 1/2" POLIURETANO	1	metro	2,5	2,5
	Resistencias eléctricas 1500W, 120V	2	componente	150	300
	Eje de acero inoxidable AISI 304 (viscosímetro) 2"	0,16	metro	212,5	34
	Eje de acero inoxidable AISI 304 (brida) 2"	0,05	metro	212,5	10,625
	Eje nylon PA66	0,2	metro	20	4
	matraz 60 ml	2	componente	100	200
	Oring de temperatura	2	componente	1,75	3,5
	Cinta de aluminio	1	c/12m	8,5	8,5
	Cable bomba	4	metro	0,55	2,2
SUB TOTAL					606,325
SISTEMA DE CONTROL	Controladores de temperatura Full Gauge	2	componente	117,05	234,1
	Sensor NTC Gauge	2	componente	25,38	50,76
	Relay estado sólido 40 Amp.	1	componente	20,64	20,64
	PIC16F628	1	componente	6	6
	Regulador 7805	2	componente	0,75	1,5
	LCD 16X2 azul	1	componente	9,5	9,5
	Transistor TIP122	4	componente	1,2	4,8
	Transistor 2N3904	23	componente	0,1	2,3
	Zócalo 20x2	1	componente	1	1
	Zócalo 9x2	1	componente	0,5	0,5
	IC ULN 2003A	3	componente	1,25	3,75
	Zócalo 4x2	10	componente	0,2	2
	Zócalo 8x2	1	componente	0,45	0,45
	TRIAC BT 136	10	componente	1,5	15
	Pulsadores	6	componente	2,5	15
	Relé 12V	3	componente	1	3
	Capacitor cerámico 0,1 Uf	2	componente	0,1	0,2
	Resistencia 330Ω 1/2 W	20	componente	0,03	0,6
	Resistencia 4.7kΩ 1/2 W	34	componente	0,05	1,7
	Resistencia 10KΩ 1/2 W	43	componente	0,05	2,15
	Resistencia variable 10KΩ	1	componente	0,5	0,5
	IC Regulador de 5Voltios	2	componente	1	2
	Conductores Cu gemelo SPT 10	3	metro	1,76	5,28
	Conductores Cu gemelo SPT 16	3	metro	0,95	2,85
	Placa baquelita medidor de nivel	2	componente	7,5	15

	Placa baquelita control del sistema	1	componente	16	16
	Placa baquelita control agitador	1	componente	6	6
	Resistencia 0.47R 10 W	1	componente	4	4
	Regulador 7806	1	componente	0,75	0,75
	Disipador Calor	1	componente	1	1
	Canaleta	5	metro	1,95	9,75
	Cinta Doble Faz	1	componente	3,15	3,15
	Borneras	4	componente	0,8	3,2
	Selector de tres posiciones 2 contactos	1	componente	4,5	4,5
	Luz piloto	6	componente	1,9	11,4
	Moc 3021	10	componente	0,79	7,9
	BT 136	10	componente	0,63	6,3
	Cable UTP	20	metro	0,5	10
	Switch	3	componente	0,45	1,35
	Lámpara	1	componente	5,8	5,8
	Fuente Power Supply 600 W	1	componente	14,75	14,75
	Breaker 1 polo 20 Amp.	1	componente	4,37	4,37
	Leds	20	componente	0,5	10
	Amarra cables	2	c/funda	0,8	1,6
SUB TOTAL					522,4
SISTEMA DE AGITACIÓN	Motor de paso CC.	1	componente	10	10
	Eje de acero inoxidable AISI 304 1/4"	0,15	metro	12,5	1,875
	Eje de transmisión SAE 1018 3/4"	0,05	metro	4,1	0,205
	PIC16F877A	1	componente	10	10
	Puerto serial DB9	1	componente	3	3
	Tornillos, tuercas, rodela, prisioneros				2,5
SUB TOTAL					27,58
SISTEMA ESTRUCTURAL	Estructura del equipo (BANCADA)	1	componente	200	200
	Mesa	1	componente	250	250
	Panel monofásico	1	componente	7,41	7,41
SUB TOTAL					457,41
COSTO TOTAL DE MATERIALES					1911,27

6.1.2 Operaciones tecnológicas/Equipos.

Tabla XXVI. Costos por operaciones tecnológicas.

OPERACIONES	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO [USD]	TOTAL [USD]
Corte (plasma)	1,5	hora	2	3
Corte (tijera - cizalla)	0,5	hora	3	1,5
Torneado	12	hora	15	180
Taladrado	1,5	hora	10	15
Soldadura TIG	2	hora	10	20
Limado y pulido	2	hora	5	10
SUB TOTAL				229,5

Herramientas manuales	
5% Operaciones Tecnológicas	11,48

6.1.3 Transporte.

Tabla XXVII. Costos por transporte y otros.

OPERACIONES	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIO UNITARIO [USD]	TOTAL [USD]
Transporte	5	hora	2,25	11,25
Otros			25	25
SUB TOTAL				36,25

Tabla XXVIII. Costos totales directos del equipo.

COSTOS	PRECIO TOTAL [USD]
Materiales	1911,27
Operaciones	229,5
Herramienta manuales	11,48
Transporte	36,25
TOTAL 1	2188,50

El total por costos directos es de 2188,50 USD (dos mil ciento ochenta y ocho dólares con cincuenta centavos).

6.2 COSTOS INDIRECTOS.

6.2.1 Costos ingenieriles.

Se debe considerar el 10% del costo del equipo o máquina (viscosímetro Saybolt Universal).

Tabla XXIX. Costos por ingeniería.

COSTO DE LA MÁQUINA[USD]	COSTO POR INGENIERÍA [USD]
2188,5	218,85

6.2.2 Costos por imprevistos.

Se considera el 5% del costo de la máquina.

Tabla XXX. Costos por imprevistos.

COSTO DE LA MÁQUINA[USD]	COSTO POR INGENIERÍA [USD]
2188,5	109,43

6.2.3 Costos por utilidad.

Se considera el 0% del costo de la máquina, debido a que es un trabajo de tesis de grado, aclarando que si se tratara de un trabajo particular se deberá establecer el mismo.

Tabla XXXI. Costos por utilidades.

COSTO DE LA MÁQUINA[USD]	COSTO POR INGENIERÍA [USD]
2188,5	0

El total por costos indirectos es de:

Tabla XXXII. Total de costos indirectos.

Costos por ingeniería [USD]	218,85
Costos por imprevistos [USD]	109,43
Costos por utilidad [USD]	0
TOTAL 2	328,28

6.3 COSTOS TOTALES DEL EQUIPO.

Tabla XXXIII. Costo total del Viscosímetro Saybolt Universal.

Costos directos [USD]	2188,5
Costos indirectos [USD]	328,28
COSTO TOTAL DEL EQUIPO	2516,78

El costo total del viscosímetro Saybolt Universal es de \$2516,78 (dos mil quinientos dieciséis dólares con setenta y ocho centavos).

CAPÍTULO VII

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1 CONCLUSIONES.

- Se ha observado que mediante la utilización de este banco de pruebas llamado Viscosímetro Saybolt Universal con un Control de Temperatura en Cascada se puede medir las viscosidades de aceites livianos a diferentes temperaturas, coincidiendo dichas viscosidades con las tabuladas mediante normas SAE.
- Se concluye que mediante un control de temperatura en cascada se controla tanto la temperatura del aceite como la temperatura del agua que calienta dicho aceite, así se logra un control anidado de la viscosidad.
- Por medio de la gráfica de la estabilización de la temperatura en función del tiempo se concluye que los valores obtenidos de la viscosidad son confiables partir de los 40°C.
- Mediante la variación de las temperaturas de seteo del controlador C1 (controlador de temperatura del aceite) se puede obtener la gráfica de la viscosidad en función de la temperatura para aceites livianos.
- Mediante el diseño de este sistema se puede obtener la viscosidad a diferentes temperaturas que no sea la temperatura ambiente, dando así un valor agregado a éste en comparación a otros viscosímetros como por ejemplo el viscosímetro de Caída de Bola que sirve solo para medir la viscosidad a temperatura ambiente.
- El tiempo de toma de datos de la viscosidad depende de la temperatura de seteo y del tipo de aceite a usar.

7.2 RECOMENDACIONES.

- Mantener el recipiente que contiene las resistencias eléctricas por lo menos con un litro de agua, o que el agua sobrepase las mismas, porque las resistencias eléctricas utilizadas en el proyecto son de inmersión.
- Al final de cada prueba siempre se debe apagar la máquina, oprimiendo el pulsador off automático (reset del sistema) y enseguida colocar la perilla de selección de modo en la parte central del mismo, de modo que no quede energizado el banco de pruebas evitando así arranques innecesarios de la bomba de recirculación de agua.
- Tener precaución de que el sensor NTC de temperatura que está dentro del aceite, no esté topando en el viscosímetro porque tanto el aceite como las paredes del viscosímetro están a distintas temperaturas, por lo tanto los datos obtenidos serán erróneos en el momento de medir la viscosidad.
- Se recomienda setear a mayor temperatura el controlador C2 en función del controlador C1, ya que a mayor necesidad de temperatura del aceite más caliente debe estar el agua que transfiere calor a dicho aceite, de lo contrario nunca se alcanzaría la temperatura de seteo del aceite, debido a las pérdidas de calor que existe en el sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- **ZABALA**, Gilberto. Apuntes de Combustión. 3ra.ed. Riobamba: ESPOCH, Octubre Del 2003.
- **IRVING**, Shames H. Mecánica de Fluidos. 3ra.ed. Colombia: Mc Graw-Hill Interamericana, S.A, 1995.
- **PERRY**, Robert & **CHILTON**, Cecil. Biblioteca del Ingeniero Químico. 5ta.ed. México DF: Mc Graw Hill, 1990.
- **MOTT**, Robert. Mecánica de Fluidos Aplicada. 4ta.ed. México DF: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1996.
- **FOX**, Robert & **DONALD**, Alan. Introducción a la Mecánica de fluidos. 2da.ed. México: Mc Graw Hill Interamericana SA, 1989.
- **SHAUM**. Mecánica de Fluidos e Hidráulica. 3ra.ed. España: Mc Graw Hill Interamericana, 1994.
- **SANTILLÁN HEREDIA**, Rodolfo. Termodinámica Básica. Riobamba: ESPOCH, 2001.
- **PARISSIENE**, Compagnie U. Vapor de Agua, Teoría y Aplicaciones. 1ra.ed. México: Limusa, 1897.
- **WEYRICK**, Robert C: Introducción al Control Automático. Barcelona: Gustavo Gili, S. A., 1977.
- **OGATA**, Katsuhiko: Ingeniería de Control Moderna. 4ta.ed. Madrid: Pearson Prentice Hall, S. A., 2003.
- **ROCA**, Alfred C. Control de Procesos. 2da.ed. Barcelona España: Alfaomega UPC, S. A.
- **BOLTON**, William: Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica. 2da.ed. México D.F: Alfaomega Grupo Editor, S.A., 2001.
- **BRITO**, Hannibal: Texto Básico de Fenómenos de Transportes.

LINKOGRAFÍA.

- www.inbio.com.ar (Grado de viscosidad SAE).
- www.mecacisa.com (Tipos de viscosímetros).
- www.widman.biz. (Curvas de variación de la viscosidad de diferentes aceites).

LISTA DE CONTENIDO

	PÁGINA
CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	12
1.1 ANTECEDENTES.....	12
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
CAPÍTULO II.....	15
2 GENERALIDADES.....	15
2.1 VISCOSIDAD DE LOS FLUIDOS.....	15
2.1.1 Definiciones de viscosidad.....	15
2.1.2 Variación de la viscosidad con la temperatura.....	16
2.1.3 Efecto de la presión sobre la viscosidad.....	18
2.1.4 Ley de Newton de la viscosidad.....	18
2.1.5 Viscosidad dinámica o absoluta (μ).....	20
2.1.6 Viscosidad cinemática (ν).....	21
2.1.7 Factores que afectan la conducta reológica.....	22
2.1.7.1 Temperatura.....	22
2.1.7.2 Rango de corte o gradiente de velocidad.....	23
2.1.7.3 Tiempo.....	24
2.1.7.4 Condiciones de medida.....	24
2.1.7.5 Historia previa.....	25
2.1.7.6 Composición y aditivos.....	25

2.1.8	Fluidos Newtonianos.	25
2.1.9	FLUIDOS NO NEWTONIANOS.	26
2.1.9.1	CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS.	27
2.1.10	Medición de la viscosidad.	28
2.1.11	Viscómetro.	28
2.2	TIPOS DE VISCOSÍMETROS.	28
2.2.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES.	29
2.2.1.1	Viscosímetro de Tubo Capilar.	29
2.2.1.1.1	Viscosímetro de Ostwald.	31
2.2.1.1.2	Viscosímetro de Ubbelohde.	33
2.2.1.2	VISCOSÍMETROS ROTATORIOS.	35
2.2.1.2.1	Viscosímetro de Stormer	36
2.2.1.2.2	Viscosímetro de cono -placa.	38
2.2.1.2.3	Viscosímetro de cilindros concéntricos o de Coutte.	39
2.2.1.2.4	Viscosímetro Brookfield.	42
2.2.1.3	VISCOSÍMETROS EMPÍRICOS.	42
2.2.1.3.1	Viscosímetro Saybolt.	43
2.2.1.3.2	Viscosímetro Redwood.	45
2.2.1.3.3	Viscosímetro Engler.	46
2.2.1.4	VISCOSÍMETRO DE HOPPLER.	47
2.2.1.4.1	Viscosímetro de caída de bola.	48
2.3	ACEITES LUBRICANTES.	51
2.3.1	Funciones de los lubricantes.	51
2.3.2	Clasificación de los lubricantes.	52
2.3.3	Propiedades físicas de los lubricantes.	52
2.3.3.1	Viscosidad.	53
2.3.3.2	Punto de inflamación.	53
2.3.3.3	Punto de fuego o ignición.	54

2.3.3.4	Punto de fluidez.....	54
2.3.3.5	Residuos de carbón.....	54
2.3.3.6	Color.....	54
2.3.3.7	Indice de viscosidad (IV).....	55
2.3.3.8	Gravedad API (Instituto Americano del Petróleo).	55
2.3.4	Características de un lubricante.....	55
2.3.4.1	Grado de viscosidad SAE (Society of Automobile Engineers).....	55
2.3.4.2	Clasificación API para aceites de motor.....	58
2.3.4.3	Grado de viscosidad ISO para aceites lubricantes.....	60
2.3.5	SINTEMP 2000	62
2.3.6	Cálculo del efecto de la temperatura sobre los aceites lubricantes.....	63
2.4	SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO MÁS ADECUADO PARA ACEITES DERIVADOS DEL PETRÓLEO.	64
2.5	TRANSFERENCIA DE CALOR	66
2.5.1	ELEMENTOS DE CALORIMETRÍA.....	67
2.5.1.1	Calor específico (C_p) o capacidad calorífica.	67
2.5.1.2	Conductividad térmica (k).	68
2.5.2	TRANSMISIÓN DEL CALOR POR CONDUCCIÓN.....	69
2.5.2.1	Conducción de calor en paredes cilíndricas.	71
2.5.2.2	Analogía termo-eléctrica.	72
2.5.3	TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN.....	75
2.5.3.1	Coeficiente de transferencia de calor por convección.	76
2.5.3.2	Números adimensionales.....	77
2.5.3.2.1	Número de Reynolds.	77
2.5.3.2.2	Número de Nusselt (o Número de Biot: B).	78
2.5.3.2.3	Número Prandtl.	79
2.5.3.2.4	Número de Grashof.	79
2.5.3.3	Convección forzada.	80

2.5.3.3.1 Régimen laminar.	81
2.5.3.3.2 Régimen turbulento.	82
2.5.3.4 Convección natural.	83
CAPÍTULO III	84
3 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL	84
3.1 COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA DE CONTROL.....	85
3.2 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO ABIERTO.	88
3.3 SISTEMAS DE CONTROL EN LAZO CERRADO.	89
3.3.1 Elementos básicos de un sistema de lazo cerrado.	89
3.4 SISTEMA DE CONTROL EN CASCADA.	91
3.5 CONTROL DE TEMPERATURA EN CASCADA.....	93
3.5.1 Ventajas del control en cascada.....	95
3.5.2 MODELOS MATEMÁTICOS.	95
3.5.2.1 Sistemas térmicos.	96
3.5.2.2 OBTENCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.	98
CAPÍTULO IV.....	103
4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	103
4.1 ALTERNATIVAS DEL DISEÑO DEL VISCOSÍMETRO.	104
4.1.1 Selección del material de construcción de los recipientes.....	104
4.1.2 Selección del material de construcción del viscosímetro.	109
4.1.3 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	109
4.2 NORMAS DE DIMENSIONAMIENTO.	110
4.2.1 Método estándar de prueba para Viscosidad Saybolt Universal.	111
4.2.2 Definiciones.....	112
4.2.3 Resumen del método de prueba.....	112
4.2.4 Preparación del equipo.	112

4.2.5	Procedimiento.....	112
4.2.6	Tipo de fluido recomendado para el baño maría.	113
4.3	DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA.	114
4.3.1	Análisis térmico del fuel oil (aceite) respecto al fluido caliente (baño maría)...	114
4.3.2	Análisis del aceite.....	115
4.3.3	Análisis del flujo de agua caliente.....	120
4.3.4	ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN.	129
4.3.5	Cálculo de las resistencias térmicas.	134
4.3.6	Cálculo de la potencia que consumen las resistencias eléctricas.....	140
CAPÍTULO V		144
5	PRUEBAS.	144
5.1	VALORES EXPERIMENTALES.....	146
5.2	COMPARACIÓN DE VALORES EXPERIMENTALES DE VISCOSIDAD CON LOS APORTADOS POR LOS FABRICANTES, PARA EVALUAR EL ERROR PORCENTUAL.	149
5.3	ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN.	152
CAPÍTULO VI.....		155
6	COSTOS.....	155
6.1	COSTOS DIRECTOS.	155
6.1.1	Materiales.	155
6.1.2	Operaciones tecnológicas/Equipos.....	158
6.1.3	Transporte.....	158
6.2	COSTOS INDIRECTOS.....	159
6.2.1	Costos ingenieriles.....	159
6.2.2	Costos por imprevistos.	159
6.2.3	Costos por utilidad.....	159

6.3 COSTOS TOTALES DEL EQUIPO.	160
CAPÍTULO VII.....	161
7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	161
7.1 CONCLUSIONES.....	161
7.2 RECOMENDACIONES.	162
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 148
ANEXOS.....	150

LISTA DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla I. Unidades de viscosidad dinámica.....	9
Tabla II. Unidades de viscosidad cinemática.....	10
Tabla III. Ecuaciones empíricas para fluidos newtonianos.....	15
Tabla IV. Constantes A y B.....	33
Tabla V. Grado de viscosidad SAE de aceites para motor.....	44
Tabla VI. Grado de viscosidad API para motores a gasolina.....	47
Tabla VII. Grado de viscosidad API para motores a diesel.....	48
Tabla VIII. Grado de viscosidad ISO.....	49
Tabla IX. Características del lubricante SYNTEMP 2000.....	50
Tabla X. Analogía Termo-eléctrica.....	60
Tabla XI. Datos técnicos de los controladores.....	74
Tabla XII. Elementos básicos térmicos.....	84
Tabla XIII. Valores instantáneos de Temperatura en función del aceite grado SAE 15W40.....	85
Tabla XIV. Valores instantáneos de Temperatura en función del aceite grado SAE 10W30.....	87
Tabla XV. Baño maría recomendado.....	99
Tabla XVI. Parámetros del Grado SAE 40.....	129
Tabla XVII. Parámetros del Grado SAE 15W40.....	130
Tabla XVIII. Parámetros del Grado SAE 10W30.....	131
Tabla XIX. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 40 desde 40 a 45°C.....	131
Tabla XX. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 40 desde 71 a 74°C.....	132
Tabla XXI. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 15W40 desde 40 a 43°C.....	132
Tabla XXII. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 15W40 desde 70 a 74°C.....	133
Tabla XXIII. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 10W30 desde 44 a 46°C.....	133

Tabla XXIV. Valores de viscosidad experimental Grado SAE 10W30 desde 71 a 72°C....	133
Tabla XXV. Costos por materiales empleados.....	140
Tabla XXVI. Costos por operaciones tecnológicas.....	143
Tabla XXVII. Costos por transporte y otros.....	143
Tabla XXVIII. Costos totales directos del equipo.....	143
Tabla XXIX. Costos por ingeniería.....	144
Tabla XXX. Costos por imprevistos.....	144
Tabla XXXI. Costos por utilidades.....	145
Tabla XXXII. Total de costos indirectos.....	145
Tabla XXXIII. Costo total del Viscosímetro Saybolt Universal.....	145

LISTA DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los líquidos.....	5
Figura 2. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad en los gases.....	6
Figura 3. Variación de la viscosidad dinámica con la temperatura, del aire y del agua...	6
Figura 4. Planos paralelos de un fluido.....	7
Figura 5. Curvas características de un fluido newtoniano.....	14
Figura 6. Viscosímetro de tubo capilar.....	18
Figura 7. Viscosímetro de Ostwald.....	19
Figura 8. Viscosímetro Ubbelohde.....	22
Figura 9. Viscosímetros Rotacionales.....	23
Figura 10. Viscosímetro de Stormer.....	24
Figura 11. Viscosímetro de cono y placa.....	26
Figura 12. Viscosímetro de cilindros concéntricos.....	28
Figura 13. Variación de la velocidad.....	29
Figura 14. Viscosímetro Saybolt con los dos tipos de orificios.....	32
Figura 15. Esquema de un Viscosímetro Engler.....	35
Figura 16. Viscosímetro Engler.....	35
Figura 17. Viscosímetro de Caída de Bola.....	37
Figura 18. Viscosidad dinámica de diferentes aceites SAE a diferentes temperaturas...	45
Figura 19. Viscosidad dinámica de un aceite multigrado SAE 15W40.....	46
Figura 20. Transmisión de calor por conducción en la pared del viscosímetro.....	57
Figura 21. Cilindro.....	59
Figura 22. Resistencias en serie de un tubo cilíndrico aislado.....	61
Figura 23. Fluido a diferentes temperaturas.....	65
Figura 24. Diagrama de bloques.....	72
Figura 25. Sensor NTC.....	72

Figura 26. Controlador digital MT – 543Ri plus.....	73
Figura 27. Esquema de conexión.....	74
Figura 28. Sistema de control en lazo abierto.....	75
Figura 29. Diagrama de control en lazo cerrado.....	76
Figura 30. Elementos básicos de un sistema de control en lazo cerrado.....	76
Figura 31. Sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt.....	80
Figura 32. Diagrama de bloques del sistema de control de temperatura del Viscosímetro Saybolt Universal.....	81
Figura 33. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 15W40).....	86
Figura 34. Curva de respuesta a un escalón unitario del sistema (SAE 10W30).....	89
Figura 35. Frasco donde se recibe la muestra de aceite (dimensiones en mm).....	96
Figura 36. Dimensiones (en mm) del Viscosímetro Saybolt Universal.....	97
Figura 37. Transferencia de calor entre el aceite y el baño maría.....	100
Figura 38. Esquema general del Viscosímetro Saybolt.....	102
Figura 39. Medidas del Viscosímetro Saybolt (milímetros).....	102
Figura 40. Entrada y salida del flujo de agua caliente.....	106
Figura 41. Diámetros externos del viscosímetro que son bañadas por el flujo de agua.....	109
Figura 42. Medidas del recipiente del baño maría (unidades en mm).....	110
Figura 43. Resistencias que intervienen en el sistema.....	119
Figura 44. Resistencias térmicas.....	120
Figura 45. Diámetros de los distintos materiales que intervienen.....	120
Figura 46. Resistencias eléctricas de inmersión.....	126
Figura 47. Viscosidad vs Temperatura del aceite grado SAE 40.....	135
Figura 48. Viscosidad vs Temperatura de un aceite grado SAE 15W40.....	136
Figura 49. Viscosidad vs Temperatura de un aceite Grado SAE 10W30.....	137